



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**POTLAČENÍ POSTRANNÍCH LALOKŮ ANTÉNNÍ ŘADY
POMOCI NEROVNOMĚRNÉHO ROZLOŽENÍ VÝKONU NA
ELEMENTECH**

SUPPRESSION OF SIDE LOBES OF AN ANTENNA ARRAY BY UNEQUAL POWER DISTRIBUTION ON THE
ELEMENTS

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Saloka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Špůrek

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Samuel Saloka

ID: 186452

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Potlačení postranních laloků anténní řady pomoci nerovnoměrného rozložení výkonu na elementech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou návrhu flíčkových anténních řad a principem potlačení postranních laloků pomocí nerovnoměrného rozložení výkonu na elementech. Vytvořte numerický model flíčkové anténní řady v konfiguraci 4x1 pro střední kmitočet 10.5 GHz.

Na navrženou řadu aplikujte metodu potlačení postranních laloků. Oba návrhy realizujte a změřte jejich parametry. Proveďte srovnání výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, Constantine A. Antenna theory: analysis and design. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 0-471-66782-x.

[2] X Band Patch Array Antenna Design for Marine Radar Application, MIKON proceedings 2018.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 23.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jan Špůrek

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom anténneho poľa štyroch antén. V prvej časti je zhrnutá teória návrhu flíčkovej antény a mikropáskového deliča s rovnomerným a nerovnomerným delením výkonu na elementoch. V druhej časti sa nachádzajú výpočty potrebné k návrhu antény a oboch polí. Tretia časť obsahuje vytvorenie a optimalizáciu jednotlivých modelov, ich simulácie a následne zhodnotenie výsledkov. Vo štvrtej časti sú zhrnuté odmerané výsledky a taktiež fotodokumentácia vyrobených štruktúr. Zhrnutie celej práce a jej výstupy sú zhodnotené v poslednej časti.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Flíčková anténa, výkonový delič, anténne pole, mikropáskové vedenie, štvrt'-vlnný transformátor, činiteľ odrazu, vyžarovacia charakteristika

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the design of an antenna array with four patch antennas. In the first part, the theory of a microstrip antenna and power divider with equal and unequal power distribution on elements design are summarized. In the second part, calculations necessary for the design of the antenna and both arrays are found. The third part contains modeling, optimizations and simulation results of the individual models and consequently the assessment of the results. A summarization of the measured results as well as photo documentation of the produced structures are in the fourth part. Conclusion of the entire work and its results are deliberated in last part.

KEYWORDS

Microstrip antenna, power divider, antenna array, microstrip line, quarter-wave transformer, reflection factor, radiation characteristic

SALOKA, S. *Potlačení postranních laloků anténní řady pomocí nerovnoměrného rozložení výkonu na elementech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 46 s. Vedúci bakalárskej práce: Ing. Jan Špůrek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Potlačení postranních laloků anténní řady pomocí nerovnoměrného rozložení výkonu na elementech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Janovi Špŕrkovi, za odborné vedenie, ochotu a všetky jeho cenné rady počas spracovania bakalárskej práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Obsah	v
Zoznam obrázkov	vi
Zoznam tabuliek	viii
Úvod	1
1 Teoretický úvod	2
1.1 Flíčková anténa	2
1.2 Výkonový delič	4
1.3 Dolph-Chebyshevová metóda	6
2 Návrh	9
2.1 Anténa	9
2.2 Delič s rovnomerným delením výkonu	11
2.3 Delič s nerovnomerným rozdelím výkonu	13
3 Modelovanie a simulácie	16
3.1 Realizácia antény	16
3.2 Modelovanie výkonového deliča s rovnomerným delením výkonu	19
3.2.1 Prvotný návrh	19
3.2.2 Prepracovaný model	22
3.2.3 Optimalizovaný model	25
3.3 Delič s nerovnomerným delením výkonu	27
3.4 Modelovanie štruktúry s rovnomerným deličom	30
3.5 Pole s nerovnomerne deleným výkonom na elementoch	33
4 Výroba	37
5 Záver	44
Literatúra	45
Zoznam symbolov, veličín a skratiek	46

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1.1 Flíčková anténa [4].....	2
Obrázok 1.2.1 Jednoduchý mikropáskový delič (vľavo) a Wilkinsonov delič výkonu (vpravo)[6]	5
Obrázok 1.2.2 Mikropáskový delič so štvrt'-vlnným vedením	6
Obrázok 3.1.1 Činiteľ odrazu prvého návrhu antény.....	16
Obrázok 3.1.2 Činiteľ odrazu záverečného návrhu antény.....	17
Obrázok 3.1.3 Výsledný model anténneho prvku.....	17
Obrázok 3.1.4 Graf smerovej charakteristiky antény rovín E a H (zložka <i>Copolar</i>)	18
Obrázok 3.1.5 Vyžarovacia charakteristika antény	19
Obrázok 3.2.1 Model prvotného návrhu výkonového deliča.....	20
Obrázok 3.2.2 Činiteľ odrazu a prenosu základného modelu deliča	20
Obrázok 3.2.3 Kompletný prvotný návrh deliča bez vyžarovacích prvkov	21
Obrázok 3.2.4 Činiteľ odrazu celkového prvotného deliča	22
Obrázok 3.2.5 Jednoduchý prepracovaný rovnomerný delič	23
Obrázok 3.2.6 Graf činiteľa odrazu prepracovaného rovnomerného deliča.....	23
Obrázok 3.2.7 Prepracovaný model celkového rovnomerného deliča	24
Obrázok 3.2.8 Graf činiteľa odrazu a prenosu celkového prepracovaného rovnomerného deliča	24
Obrázok 3.2.9 Vyžarovacia charakteristika prepracovaného celkového deliča	25
Obrázok 3.2.10 Optimalizovaný model celkového rovnomerného deliča.....	26
Obrázok 3.2.11 Graf činiteľov odrazu prenosu celkového optimalizovaného rovnomerného deliča.....	26
Obrázok 3.2.12 Vyžarovacia charakteristika celkového prepracovaného rovnomerného deliča	27
Obrázok 3.3.1 Delič s nerovnomerným delením výkonu	29
Obrázok 3.3.2 Činitele odrazu a prenosu nerovnomerného deliča v závislosti na frekvencii	29
Obrázok 3.3.3 Vyžarovacia charakteristika nerovnomerného deliča	30
Obrázok 3.4.1 Model štruktúry s rovnomerným rozložením výkonu na anténnych prvkoch	30
Obrázok 3.4.2 Činiteľ odrazu štruktúry s rovnomerným rozložením výkonu na elementoch	31
Obrázok 3.4.3 Vyžarovacia charakteristika rovnomernej štruktúry v rovine E	31

Obrázok 3.4.4 Vyžarovacia charakteristika rovnomernej štruktúry v rovine H.....	32
Obrázok 3.4.5 Porovnanie vyžarovacích charakteristík deliča a štruktúry pre obe roviny	32
Obrázok 3.4.6 Vyžarovacia charakteristika rovnomernej štruktúry	33
Obrázok 3.5.1 Štruktúra s nerovnomerným rozdelením výkonu na elementoch.....	33
Obrázok 3.5.2 Graf činiteľov odrazu simulovanej rovnomernej a nerovnomernej štruktúry	34
Obrázok 3.5.3 Vyžarovacia charakteristika v rovine E pre oba typy štruktúr.....	34
Obrázok 3.5.4 Vyžarovacia charakteristika v rovine H pre oba typy štruktúr	35
Obrázok 3.5.5 Porovnanie vyžarovacích charakteristík v rovine E a H pre štruktúru a delič s nerovnomerným rozdelením výkonu	35
Obrázok 3.5.6 Vyžarovacia charakteristika nerovnomernej štruktúry	36
Obrázok 4.1 Vyrobená štruktúra s rovnomerným delením výkonu.....	37
Obrázok 4.2 Vyrobená štruktúra s nerovnomerným delením výkonu.....	37
Obrázok 4.3 Porovnanie činiteľov odrazu reálnej a teoretickej rovnomernej štruktúry.	38
Obrázok 4.4 Činiteľ odrazu simulovaný a meraný pre nerovnomernú štruktúru	39
Obrázok 4.5 Porovnanie činiteľa odrazu z nameraných hodnôt pre obe štruktúry.....	39
Obrázok 4.6 Porovnanie smerových charakteristík z nameraných hodnôt pre obe štruktúry v rovine E.....	40
Obrázok 4.7 Porovnanie smerových charakteristík z nameraných hodnôt pre obe štruktúry v rovine H	40
Obrázok 4.8 Porovnanie smerových charakteristík zo simulácie a merania pre štruktúru s rovnomerným rozložením výkonu na elementoch v rovine E.....	41
Obrázok 4.9 Porovnanie smerových charakteristík zo simulácie a merania pre štruktúru s rovnomerným rozložením výkonu na elementoch v rovine H	41
Obrázok 4.10 Porovnanie smerových charakteristík zo simulácie a merania pre štruktúru s nerovnomerným rozložením výkonu na elementoch v rovine E.....	42
Obrázok 4.11 Porovnanie smerových charakteristík zo simulácie a merania pre štruktúru s nerovnomerným rozložením výkonu na elementoch v rovine H	42

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 2.1.1 Prehľad vypočítaných rozmerov antény.....	11
Tabuľka 2.2.1 Prehľad vypočítaných rozmerov výkonového deliča	12
Tabuľka 2.3.1 Zhrnutie vypočítaných parametrov transformátorov pre delič s nerovnomerným rozdelením výkonu	15
Tabuľka 3.1.1 Rozmery výsledného modelu antény	18
Tabuľka 3.2.1 Zoznam výsledných rozmerov prvotného základného deliča	21
Tabuľka 3.3.1 Zhrnutie prepočítaných parametrov transformátorov pre delič s nerovnomerným rozdelením výkonu	28
Tabuľka 3.5.1 Zhrnutie jednotlivých hodnôt odstupu bočných lalokov od hlavného	43

ÚVOD

Návrh anténneho poľa má oproti samotnej anténe jednu hlavnú výhodu a to zvýšenie smerovosti antény, čo je dosiahnuté zúžením hlavného laloku. S návrhom anténneho poľa sa návrhár dostáva k problému s vysokou úrovňou bočných lalokov. Cieľom tejto práce je potlačenie tejto vysokej úrovne postranných lalokov návrhom anténneho poľa s nerovnomerným rozložením výkonu na elementoch.

Návrh anténneho poľa sa skladá z dvoch hlavných krokov. Prvým krokom je návrh flíčkovej antény, vyžarovacieho prvku, ktorý mení dodávaný výkon na elektromagnetické vlny šíriace sa prostredím. Druhým krokom je navrhnuť delič výkonu s jedným vstupom a s potrebným počtom výstupov.

V tejto bakalárskej práci budú navrhované dve anténne polia, jedno s rovnomerným rozložením výkonu na elementoch a druhé s nerovnomerným rozložením výkonu. Obe štruktúry budú navrhnuté pre pracovnú frekvenciu 10,5 GHz v konfigurácii 1x4, čo znamená, že pole bude obsahovať jeden vstup a štyri výstupy v podobe štyroch anténnych prvkov.

Podľa zadanej rezonančnej frekvencie je takéto anténne pole možné uplatniť v námorníctve alebo letectve. Táto frekvencia patrí do pásma X, ktoré využívajú napríklad vojenské komunikačné satelity alebo tiež rádiolokačné satelity.

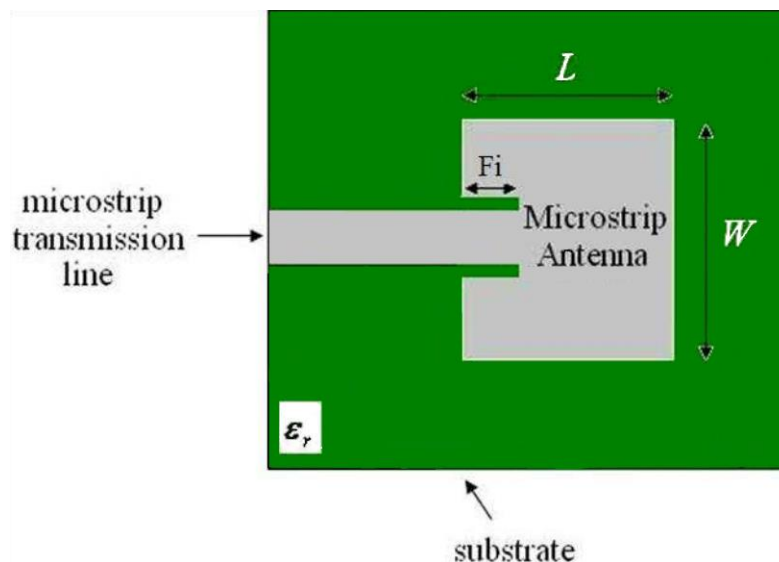
Nakoniec budú navrhnuté štruktúry vyrobené a odmerané potrebné parametre. Tieto výsledky budú následne zhodnotené a porovnané s teoretickými hodnotami zo simulácii.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

Flíčkové antény sú v dnešnej dobe veľmi rozšírené hlavne vďaka ich jednoduchej výrobe a to priamym vytlačéním na obvodovú dosku, malým rozmerom, nízkej cene a taktiež veľkej šírke pásma (stovky MHz až desiatky GHz). Vo veľkej miere sú rozšírené na trhu s mobilnými telefónmi, aplikujú sa ale napríklad aj na steny budov, trupy lietadiel či satelity [1]. Parametre antén a následne aj anténnych polí, ako sú šírka pásma (anglicky *Bandwidth*), či nízka úroveň bočných lalokov (anglicky *Sidelobe Level*), sú vo väčšine prípadoch využitia veľmi kritické. Úroveň bočných lalokov, ktorá je v tejto práci veľmi podstatným parametrom, v rozmedzí -5 dB až -20 dB je považovaná ako nízka úroveň a úroveň menšia ako -20 dB je označovaná za veľmi nízku [3][2]. V tejto práci bude na dosiahnutie nízkej úrovne bočných lalokov použitá metóda Dolph-Chebyshev.

1.1 Flíčková anténa

Základná štruktúra flíčkových antén pozostáva zo zemniacej plochy, substrátu a samotnej vyžarovacej časti antény (ďalej len anténa, anglicky *patch*). Anténa môže nadobúdať rôznych tvarov, v tomto prípade bude jej tvar obdĺžnikový. Parametre substrátu ako výška h , relatívna permitivita ϵ_r a stratový činiteľ $tg \delta$ sú stanovené pre každý substrát výrobcom, naopak rozmery antény, ako je šírka W , dĺžka L a iné, je potrebné vypočítať. Spomínaná šírka antény nepriamo úmerne ovplyvňuje jej impedanciu a naopak priamo úmerne šírku frekvenčného pásma, dĺžka antény ovplyvňuje rezonančnú frekvenciu nepriamo úmerne [3]. Ako napájanie bude zvolené mikropáskové vedenie (anglicky *microstrip line*, viz. Obrázok 1.1.1).



Obrázok 1.1.1 Flíčková anténa [4]

V prvom rade bude vypočítaná šírka antény W podľa vzťahu:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}},$$

Rovnica 1.1.1 Vzťah pre výpočet šírky flíčku

kde c je rýchlosť svetla vo vákuu, f_r je pracovná (rezonančná) frekvencia antény a ϵ_r je relatívna permitivita substrátu [1].

V ďalšom kroku bude spočítaná efektívna dielektrická konštanta nasledovne:

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}},$$

Rovnica 1.1.2 Vzťah pre výpočet efektívnej dielektrickej konštanty

kde h je výška substrátu [1].

So známou hodnotou efektívnej dielektrickej konštanty sa následne môže vypočítať efektívne predĺženie antény zo vzťahu [1]:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{\epsilon_{ef} + 0,3}{\epsilon_{ef} - 0,258} \frac{\frac{W}{h} + 0,264}{\frac{W}{h} + 0,8}$$

Rovnica 1.1.3 Vzťah pre výpočet efektívneho predĺženia mikropásku

Ďalej sa vypočíta efektívna dĺžka antény pomocou vzťahu [1]:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

Rovnica 1.1.4 Vzťah pre výpočet efektívnej dĺžky

Konečná dĺžka antény bude spočítaná vzťahom [1]:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L$$

Rovnica 1.1.5 Vzťah pre výpočet dĺžky antény

Pre návrh flíčkovej antény je taktiež potrebné určiť rozmery napájacieho mikropásku. Ten je v tomto prípade potrebné prispôbiť na impedanciu o veľkosti 50Ω . Vzhľadom na známu hodnotu impedancie je možné určiť pomocné hodnoty pre výpočet šírky mikropásku nasledovne:

$$a = \frac{z_q}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right],$$

Rovnica 1.1.6 Vzťah pre výpočet pomocného parametra a

$$b = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}},$$

Rovnica 1.1.7 Vzťah pre výpočet pomocného parametra b

kde Z_0 je spomínaná charakteristická impedancia (50Ω) a ϵ_r je relatívna permitivita substrátu [1].

Šírku mikropásku vypočítame podľa vzťahov:

$$\frac{w}{h} = \frac{8\exp(a)}{\exp(2a)-2}, \quad a > 1,52,$$

Rovnica 1.1.8 Vzťah pre výpočet šírky mikropásku ($a > 1,52$)

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(b - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\}, \quad a \leq 1,52,$$

Rovnica 1.1.9 Vzťah pre výpočet šírky mikropásku ($a \leq 1,52$)

kde a a b boli vypočítané podľa vzťahov (2.6), h je výška použitého substrátu a ϵ_r je jeho relatívna permitivita [1].

Posledným krokom bude potrebné určiť rozmery substrátu a zároveň zemnej plochy nasledovnými vzťahmi [4]:

$$W_s = 2W,$$

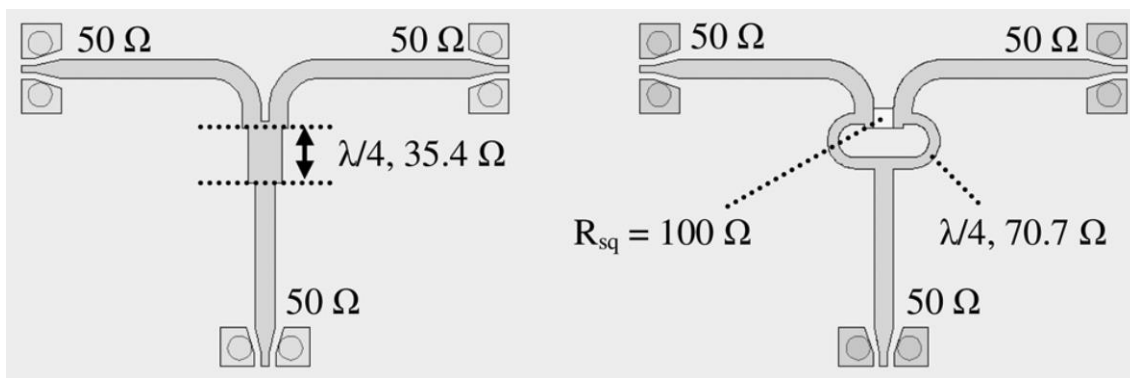
Rovnica 1.1.10 Vzťah pre výpočet šírky substrátu

$$L_s = 2L,$$

Rovnica 1.1.11 Vzťah pre výpočet dĺžky substrátu

1.2 Výkonový delič

Odporový delič výkonu (anglicky *Power Divider*, ďalej už len delič) je pasívny mikrovlnný komponent, ktorý slúži na rozdeľovanie vstupného výkonu na požadovaný počet výstupných. K najznámejším výkonovým deličom patria Wilkinsonov výkonový delič a delič typu T známy aj ako 3 dB delič (anglicky *Half power divider*), pretože vstupný signál rovnomerne rozdelí na dva signály s rovnakou amplitúdou a fázou [5]. Pre naše anténne pole bude použitý delič typu T (viz. Obrázok 1.2.1).



Obrázok 1.2.1 Jednoduchý mikropáskový delič (vľavo) a Wilkinsonov delič výkonu (vpravo)[6]

Delič typu T má jeden port pre vstup a dva porty pre výstup. Všetky 3 porty sa impedančne prispôsobujú na impedanciu 50Ω a to príslušnou šírkou vedenia. Vstup môžeme rozdeliť na dve rovnaké vedenia a to o impedancii 100Ω podľa vzorca:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

Rovnica 1.2.1 Vzťah pre výpočet celkového odporu v paralelnom zapojení

kde R je celkový odpor (50Ω) a R_1 a R_2 sú odpory/vedenia zapojené paralelne. Po rozdelení vstupu na dve ramená o impedancii 100Ω , ktoré môžu nadobúdať akejkol'vek dĺžky, čo je dôvod prečo nie sú viditeľné na Obrázok 1.2.1 (nulová dĺžka), je potrebné ich jednotlivo pripojiť k výstupom (50Ω) a preto bude medzi nich vložený tzv. štvrt'-vlnný transformátor (anglicky *quarter-wave transformer*, viz. Obrázok 1.2.2) o dĺžke $\lambda/4$ a šírke w . Jeho šírka bude počítaná za pomoci vzťahov Rovnica 1.1.6, Rovnica 1.1.7 a Rovnica 1.1.8 alebo Rovnica 1.1.9, kde Z_q bude vypočítané nasledovne:

$$Z_q = \sqrt{Z_1 Z_2},$$

Rovnica 1.2.2 Vzťah pre výpočet impedancie štvrt'-vlnného vedenia

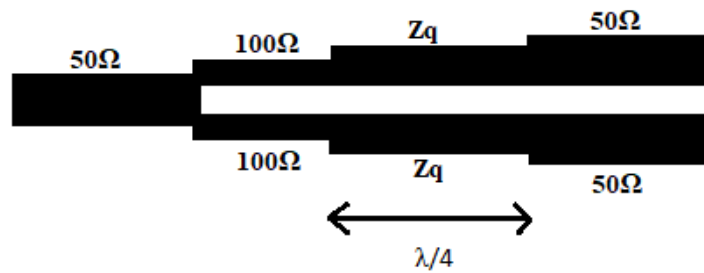
kde Z_q je impedancia štvrt'-vlnného transformátoru a Z_1 a Z_2 sú impedancie vedení prepojené transformátorom [4][2].

Jeho dĺžka bude ďalej vypočítaná nasledovne:

$$l_{70,7} = \frac{\lambda}{4},$$

Rovnica 1.2.3 Vzťah pre výpočet dĺžky štvrt'-vlnného transformátoru

kde λ je vlnová dĺžka antény.



Obrázok 1.2.2 Mikropáskový delič so štvrt'-vlnným vedením

Vlastnosť, že paralelné vedenia o impedancii $100\ \Omega$ môžu nadobúdať akúkoľvek dĺžku, bude neskôr využitá pri prispôbovaní ramien deliča k rozmerom anténneho poľa.

1.3 Dolph-Chebyshevová metóda

Ako bolo v úvode spomenuté, v tejto práci bude použitá metóda Dolph-Chebyshev, ktorej cieľom je potlačenie postranných lalokov anténneho poľa. Táto metóda spočíva v navrhnutí tzv. váh, podľa ktorých bude následne vstupný výkon nerovnomerne rozdelený do jednotlivých ramien deliča a tým bude dosiahnuté nerovnomerné rozloženie výkonu na jednotlivých elementoch, čím by v konečnom dôsledku mala byť dosiahnutá nižšia úroveň postranných lalokov [7].

Pri použití tejto metódy je podstatných niekoľko parametrov. V prvom rade je to počet anténnych prvkov N , vzdialenosť jednotlivých prvkov d a požadovaná úroveň potlačenia bočných lalokov S .

Najprv je potrebné si určiť Chebyshevov polynóm, ktorý bude neskôr použitý pri výpočte jednotlivých váh [7][7]:

$$T_0(t) = 1,$$

$$T_1(t) = t,$$

$$T_m(t) = 2tT_{m-1}(t) - T_{m-2}(t), m = 2, 3, \dots, N-1$$

Rovnica 1.3.1 Vzťah pre Chebyshevov polynóm [7]

Ďalším parametrom, ktorý je potrebné vypočítať, je tzv. *faktor poľa* (anglicky *array factor*, *AF*) a to nasledovne [7]:

$$AF = \sum_{n=1}^M w_n \cos[(2n-1)u],$$

Rovnica 1.3.2 Vzťah pre výpočet faktora poľa [7]

kde $u = kd \cos \theta / 2$ je parameter ovplyvnený vzdialenosťou jednotlivých výstupov, k je vlnové číslo a $n = 1, 2, \dots, N$ určuje poradie výstupného ramena deliča.

Aby bolo možné neskôr tento faktor poľa porovnať s Chebyshevovým polynómom,

je potrebné si spomenúť na niektoré trigonometrické vzťahy [7]:

$$\cos(2u) = 2\cos^2 u - 1,$$

$$\cos(3u) = 4\cos^3 u - 3\cos u,$$

$$\cos(4u) = 8\cos^4 u - 8\cos^2 u + 1.$$

Rovnica 1.3.3 Použité trigonometrické vzťahy [7]

Po zjednodušení vzťahu faktora poľa za pomoci jednej z predchádzajúcich rovníc a substituovaním následnou rovnicou:

$$\cos(u) = \frac{t}{t_0},$$

Rovnica 1.3.4 Substitučný vzťah [7]

z rovnice faktora poľa získame požadovaný polynóm. Následne môžeme túto rovnicu porovnať s Chebyshevovým polynómom [7].

Po tomto porovnaní dostávame dve neznáme a to w_n a t_0 , kde parameter t_0 , ktorý určuje úroveň bočných lalokov, určíme nasledovne [7]:

$$t_0 = \cosh \left[\frac{\cosh^{-1}(S)}{N-1} \right],$$

Rovnica 1.3.5 Vzťah pre výpočet parametra t_0 [7]

$$S[\text{dB}] = 20\log(S)$$

Rovnica 1.3.6 Vzťah pre výpočet úrovne potlačenia [7]

kde, S je požadovaná úroveň potlačenia vyjadrovaná v lineárnych jednotkách a N je počet prvkov poľa.

Po určení hodnôt váh na jednotlivých prvkoch poľa (vnútorné a vonkajšie) je potrebné ešte určiť impedanciu štvrt'vlnných transformátorov, ktorými bude vstupný výkon následne rozdelený do ramien podľa vypočítaných váh. Toto dosiahneme nasledovnými vzťahmi [10]:

$$\alpha = \frac{w_2}{w_1},$$

Rovnica 1.3.7 Výpočet pomocnej konštanty α [10][10]

$$Z_{OUT} = 50 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right),$$

Rovnica 1.3.8 Vzťah pre výpočet impedancie mikropásku vonkajšieho ramena [10]

$$Z_{\lambda/4OUT} = \sqrt{50Z_{OUT}},$$

Rovnica 1.3.9 Vzťah pre výpočet impedancie štvrt'-vlnného transformátora vonk. ramena [10]

$$Z_{IN} = 50(1 + \alpha),$$

Rovnica 1.3.10 Vzťah pre výpočet impedancie mikropásku vnútorného ramena [10]

$$Z_{\lambda/4IN} = \sqrt{50Z_{IN}},$$

Rovnica 1.3.11 Vzťah pre výpočet impedancie štvrt'-vlnného transformátora vnút. ramena [10]

kde Z_{OUT} a Z_{IN} sú pomyselné ramená nulovej dĺžky, spájajúce mikropásiky o impedancii 50Ω a štvrt'-vlnné transformátory (index $\lambda/4$) v sekundárnej časti delenia výkonu deliča.

Nakoniec boli, použitím vzťahov Rovnica 1.1.6 a Rovnica 1.1.8, dopočítané rozmery jednotlivých štvrt'-vlnných transformátorov.

2 NÁVRH

Pri návrhu flíčkovej antény hrá dôležitú rolu výber dielektrického substrátu. Jeho permitivita sa obvykle pohybuje v rozmedzí $2,2 < \epsilon_r < 12$ a má vplyv na rozmery, šírku pásma a samotnú účinnosť antény. Výška taktiež výrazne ovplyvňuje šírku frekvenčného pásma antény a to priamou úmerou, teda vyšší substrát znamená širšie pásmo čo ale zapríčini, že anténa bude rozmerovo väčšia. Ak je potrebné navrhnuť čo najmenšiu anténu, volí sa nižší substrát s vyššou permitivitou, čo je na úkor úzkeho pásma a zvýšia sa straty a teda, zníži sa jej účinnosť [1]. Výška medenej plochy sa vo všeobecnosti volí 30-35 μm , čo platí pre zemniacu plochu, delič a taktiež samotnú anténu.

2.1 Anténa

Základom každého návrhu antény je rezonančná frekvencia, na ktorej má navrhovaná anténa pracovať a v tejto práci bola zadaná na 10,5 GHz. Ďalším dôležitým faktorom je voľba substrátu a jeho parametre. V tomto prípade je použitým materiálom Arlon 25N s relatívnou permitivitou $\epsilon_r = 3,38$, výškou $h = 1,524$ mm a stratový činiteľ substrátu je $\text{tg } \delta = 0,0025$. Výška medenej plochy bola pre tento návrh zvolená 30 μm .

V prvom kroku bude vypočítaná šírka antény W podľa vzorca (Rovnica 1.1.1):

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10,5 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{3,38 + 1}{2}}} = 9,65 \text{ mm}$$

Rovnica 2.1.1 Výpočet šírky flíčku

So známou hodnotou šírky vodivého motívu a známou výškou použitého substrátu je možné vypočítať efektívnu dielektrickú konštantu zo vzťahu (Rovnica 1.1.2):

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} = \frac{3,38 + 1}{2} + \frac{3,38 - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{1,524}{9,65}}} = 2,889$$

Rovnica 2.1.2 Výpočet efektívnej dielektrickej konštanty

V nasledujúcom kroku je vypočítané efektívne predĺženie antény vzťahom (Rovnica 1.1.3):

$$\begin{aligned} \Delta L &= 0,412h \frac{\epsilon_{ef} + 0,3}{\epsilon_{ef} - 0,258} \frac{\frac{W}{h} + 0,264}{\frac{W}{h} + 0,8} = \\ &= 0,412 \cdot 1,524 \cdot \frac{2,89 + 0,3}{2,89 - 0,258} \frac{\frac{9,65}{1,524} + 0,264}{\frac{9,65}{1,524} + 0,8} = 0,347 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rovnica 2.1.3 Výpočet efektívneho predĺženia antény

Ďalej je potrebné vypočítať efektívnu dĺžku antény nasledovne (Rovnica 1.1.4):

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10,5 \cdot 10^9 \sqrt{3,38}} = 7,77 \text{ mm}$$

Rovnica 2.1.4 Výpočet efektívnej dĺžky antény

Posledný krok pre výpočet výslednej dĺžky antény je použitie vzťahu (Rovnica 1.1.5):

$$L = L_{eff} - 2\Delta L = 7,77 - 2 \cdot 0,347 = 7,076 \text{ mm}$$

Rovnica 2.1.5 Výpočet dĺžky antény

Potom sa spočítajú pomocné parametre pre výpočet šírky napájacieho mikropásku vzťahmi (Rovnica 1.1.6 a Rovnica 1.1.7):

$$a = \frac{z_q}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1} \left[0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right] = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{3,38+1}{2}} + \frac{3,38-1}{3,38+1} \left[0,23 + \frac{0,11}{3,38} \right] = 1,376$$

Rovnica 2.1.6 Výpočet pomocného parametra a

$$b = \frac{60\pi^2}{z_q\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{3,38}} = 6,44$$

Rovnica 2.1.7 Výpočet pomocného parametra b

Keďže $a \leq 1,52$, pre výpočet šírky napájacieho mikropásku bude použitý vzorec (Rovnica 1.1.9) nasledovne:

$$w = \frac{2}{\pi} h \left\{ b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\epsilon_r-1}{2\epsilon_r} \left[\ln(b - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} = \frac{2}{\pi} \cdot h \cdot \left\{ 6,44 - 1 - \ln(2 \cdot 6,44 - 1) + \frac{3,38-1}{2 \cdot 3,38} \cdot \left[\ln(6,44 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{3,38} \right] \right\} = 3,526 \text{ mm}$$

Rovnica 2.1.8 Výpočet šírky napájacieho mikropásku

Na záver teoretického návrhu antény je potrebné vypočítať rozmery substrátu podľa vzťahov (Rovnica 1.1.10 a Rovnica 1.1.11):

$$W_s = 2W = 2 \cdot 9,65 = 19,3 \text{ mm}$$

Rovnica 2.1.9 Výpočet šírky substrátu

$$L_s = 2L = 2 \cdot 7,076 = 14,152 \text{ mm}$$

Rovnica 2.1.10 Výpočet dĺžky substrátu

Tabuľka 2.1.1 Prehľad vypočítaných rozmerov antény

Parameter	Hodnota
W (mm)	9,65
L (mm)	7,076
w (mm)	3,526
WS (mm)	19,3
LS (mm)	14,152

2.2 Delič s rovnomerným delením výkonu

Pri návrhu akéhokoľvek deliča je najdôležitejším parametrom šírka jednotlivých vedení jeho ramien. Substrát bol použitý rovnaký ako pri návrhu antény, teda Arlon 25N. Prvou časťou je vstupný mikropásik o impedancii 50Ω , ktorého šírka bola počítaná v časti 2.1 vzťahom (Rovnica 1.1.9):

$$w_{50} = 3,526 \text{ mm}$$

Rovnica 2.2.1 Výpočet šírky vstupného mikropásku

V ďalšom kroku, ako bolo popísané v časti 1.2, budú na vstupný mikropásik pripojené dve ramená o rovnakej impedancii a to 100Ω . Ich šírka bude počítaná obdobne ako v predchádzajúcom kroku, no do vzorcov bude dosadené $Z_q = 100 \Omega$. Pomocné parametre budú preto počítané vzťahmi (Rovnica 1.1.6 a Rovnica 1.1.7):

$$a = \frac{Z_q}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right] = \frac{100}{60} \sqrt{\frac{3,38 + 1}{2}} + \frac{3,38 - 1}{3,38 + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{3,38} \right] = 2,609$$

Rovnica 2.2.2 Výpočet pomocného parametra a

$$b = \frac{60\pi^2}{Z_q \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{60\pi^2}{100 \sqrt{3,38}} = 3,22$$

Rovnica 2.2.3 Výpočet pomocného parametra b

Vzhľadom na to, že $a > 1,52$, bude použitá rovnica (Rovnica 1.1.8) takto:

$$w_{100} = h \frac{8 \exp(a)}{\exp(2a) - 2} = \frac{1,524 \cdot 8 \cdot e^{2,609}}{e^{2 \cdot 2,609} - 2} = 0,907 \text{ mm}$$

Rovnica 2.2.4 Výpočet šírky mikropásku s impedanciou 100Ω

V tomto kroku sú známe všetky potrebné parametre k výpočtu štvrt'vlnného transformátoru. Ako prvé je potrebné určiť jeho charakteristickú impedanciu, ktorá sa vypočíta vzťahom (Rovnica 1.2.2):

$$Z_q = \sqrt{Z_1 Z_2} = \sqrt{50 \cdot 100} = 70,7 \, \Omega$$

Rovnica 2.2.5 Výpočet impedancie štvrt'-vlnného vedenia

So známou hodnotou charakteristickej impedancie je možné určiť jeho šírku a to rovnakou metódou ako pri 50 a 100 ohmových vedeniach. Vypočítajú sa pomocné parametre a a b podľa (Rovnica 1.1.6 a Rovnica 1.1.7) a potom sa určí samotná šírka podľa (Rovnica 1.1.8 alebo Rovnica 1.1.9) vzhľadom k podmienkam a to nasledovne:

$$a = \frac{q}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right] = \frac{70,7}{60} \sqrt{\frac{3,38 + 1}{2}} + \frac{3,38 - 1}{3,38 + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{3,38} \right] = 1,886$$

Rovnica 2.2.6 Výpočet pomocného parametra a

$$b = \frac{60\pi^2}{Z_q \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{60\pi^2}{70,7 \sqrt{3,38}} = 4,556$$

Rovnica 2.2.7 Výpočet pomocného parametra b

Opäť bola splnená podmienka $a > 1,52$, takže bude použitý vzťah (Rovnica 1.1.9):

$$w_{70,7} = h \frac{8 \exp(a)}{\exp(2a) - 2} = \frac{1,524 \cdot 8 \cdot e^{1,886}}{e^{2 \cdot 1,886} - 2} = 1,938 \, mm$$

Rovnica 2.2.8 Výpočet šírky štvrt'-vlnného vedenia

Nakoniec bude určená jeho dĺžka podľa rovnice (Rovnica 1.2.3):

$$l_{70,7} = \frac{\lambda}{4} = \frac{28,57}{4} = 7,14 \, mm$$

Rovnica 2.2.9 Výpočet dĺžky štvrt'-vlnného vedenia

Tieto jednotlivé šírky mikropáskov boli následne zhrnuté v Tabuľka 2.2.1.

Tabuľka 2.2.1 Prehľad vypočítaných rozmerov výkonového deliča

Parameter	Hodnota
w50 (mm)	3,526
w100 (mm)	0,907
Z _q (mm)	70,7
w _{70,7} (mm)	1,938
l _{70,7} (mm)	7,14

2.3 Delič s nerovnomerným rozdelím výkonu

Návrh deliča s nerovnomerným rozdelením výkonu bude vychádzať z modelu deliča s rovnomerným delením výkonu, konkrétne modifikáciou štvrt'-vlnných transformátorov v sekundárnej časti delenia Dolph-Chebyshevovou metódou. Pri použití tejto metódy je v prvom rade potrebné vypočítať faktor poľa a to nasledovne (Rovnica 1.3.2):

$$AF = \sum_{n=1}^M w_n \cos[(2n-1)u] = \sum_{n=1}^2 w_n \cos[(2n-1)] = w_1 \cos(u) + w_2 \cos(3u).$$

Rovnica 2.3.1 Vzťah pre faktor poľa

Túto rovnicu upravíme pomocou jednej z trigonometrických rovníc (Rovnica 1.3.3) takto:

$$AF = w_1 \cos u + w_1(4 \cos^3 u - 3 \cos u) = \cos u(w_1 - 3w_2) + 4w_2 \cos^3 u.$$

Rovnica 2.3.2 Upravený vzťah faktoru poľa

Následne je možné túto rovnicu substituovať vzťahom (Rovnica 1.3.4) a to nasledovne:

$$AF = \frac{t}{t_0}(w_1 - 3w_2) + \left(\frac{t}{t_0}\right)^3 4w_2$$

Rovnica 2.3.3 Substituovaný vzťah pre výpočet faktora poľa

Pre porovnanie výsledného polynómu s Chebyshevovým polynómom, je potrebné ho vypočítať a to vzťahom (Rovnica 1.3.1):

$$T_0(t) = 1, T_1(t) = t,$$

$$T_m(t) = 2tT_{m-1}(t) - T_{m-2}(t), m = 2, 3, \dots, N-1$$

$$T_2(t) = 2tT_1(t) - T_0(t) = 2t^2 - 1,$$

$$T_3(t) = 2tT_2(t) - T_1(t) = 4t^3 - 3t,$$

Rovnica 2.3.4 Vzťah pre Dolph-Chebyshevov polynóm

Pre určenie požadovaných váh je potrebné určiť ešte jednu neznámu a to t_0 vzťahom (Rovnica 1.3.5), kde neznámu S najprv určíme upraveným vzťahom (Rovnica 1.3.6) nasledovne:

$$S = 10^{\frac{S[\text{dB}]}{20}} = 10^{\frac{30}{20}} = 31,6227$$

Rovnica 2.3.5 Prepočet úrovne potlačenia na lineárne jednotky

$$t_0 = \cosh \left[\frac{\cosh^{-1}(S)}{N-1} \right] = \cosh \left[\frac{\cosh^{-1}(31,6227)}{4-1} \right] = 2,1175,$$

Rovnica 2.3.6 Výpočet parametra t_0

Po vypočítaní všetkých potrebných parametrov, nasleduje porovnanie jednotlivých polynómov a určenie hodnôt váh nasledovne:

$$4w_2 = 4t_0^3 \Rightarrow w_2 = t_0^3 = 2,1175^3 = 9,4945$$

Rovnica 2.3.7 Výpočet váhy vonkajších ramien deliča

$$w_1 - 3w_2 = -3t^0 \Rightarrow w_1 = 3w_2 - 3t^0 = 3 \cdot 9,4945 - 3 \cdot 2,1175 = 22,1308$$

Rovnica 2.3.8 Výpočet váhy vnútorných ramien deliča

Následne, za použitia vzťahov Rovnica 1.3.7 až Rovnica 1.3.11, budú určené impedancie jednotlivých štvrt'-vlnných transformátorov takto:

$$\alpha = \frac{w_2}{w_1} = \frac{9,4945}{22,1308} = 0,429,$$

Rovnica 2.3.9 Výpočet pomeru váh

$$Z_{OUT} = 50 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) = 50 \left(1 + \frac{1}{0,429} \right) = 166,55 \, \Omega,$$

Rovnica 2.3.10 Výpočet impedancie vonk. ramena

$$Z_{\lambda/4OUT} = \sqrt{50Z_{OUT}} = \sqrt{50 \cdot 166,55} = 91,25 \, \Omega,$$

Rovnica 2.3.11 Výpočet impedancie štvrt'-vlnného transformátora vonk. ramena

$$Z_{IN} = 50(1 + \alpha) = 50(1 + 0,429) = 71,45 \, \Omega,$$

Rovnica 2.3.12 Výpočet impedancie vnút. Ramena

$$Z_{\lambda/4IN} = \sqrt{50Z_{IN}} = \sqrt{50 \cdot 71,45} = 59,77 \, \Omega,$$

Rovnica 2.3.13 Výpočet impedancie štvrt'-vlnného transformátora vnút. Ramena

Nakoniec boli určené šírky oboch transformátorov, podobne ako v časti 2.1 a 2.2, konkrétne vzťahmi Rovnica 1.1.6 a Rovnica 1.1.8:

$$a = \frac{z_q}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right] = \frac{91,25}{60} \sqrt{\frac{3,38 + 1}{2}} + \frac{3,38 - 1}{3,38 + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{3,38} \right] = 2,393,$$

Rovnica 2.3.14 Výpočet pomocného parametra a

$$w_{91} = h \frac{8 \exp(a)}{\exp(2a) - 2} = \frac{1,524 \cdot 8 \cdot e^{2,393}}{e^{2 \cdot 2,393} - 2} = 1,13 \text{ mm}$$

Rovnica 2.3.15 Výpočet šírky vonk. transformátora

$$a = \frac{z_q}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right] = \frac{59,77}{60} \sqrt{\frac{3,38 + 1}{2}} + \frac{3,38 - 1}{3,38 + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{3,38} \right] = 1,616,$$

Rovnica 2.3.16 Výpočet pomocného parametra a

$$w_{59} = h \frac{8 \exp(a)}{\exp(2a) - 2} = \frac{1,524 \cdot 8 \cdot e^{1,616}}{e^{2 \cdot 1,616} - 2} = 2,63 \text{ mm}$$

Rovnica 2.3.17 Výpočet šírky vonk. transformátora

Po vypočítaní všetkých potrebných parametrov, boli tieto hodnoty zhrnuté v Tabuľka 2.3.1.

Tabuľka 2.3.1 Zhrnutie vypočítaných parametrov transformátorov pre delič s nerovnomerným rozdelením výkonu

Parameter	Hodnota
$Z_{N/4,OUT}(\Omega)$	91,25
$w_{91} \text{ (mm)}$	1,13
$Z_{N/4,IN}(\Omega)$	59,77
$w_{59} \text{ (mm)}$	2,633

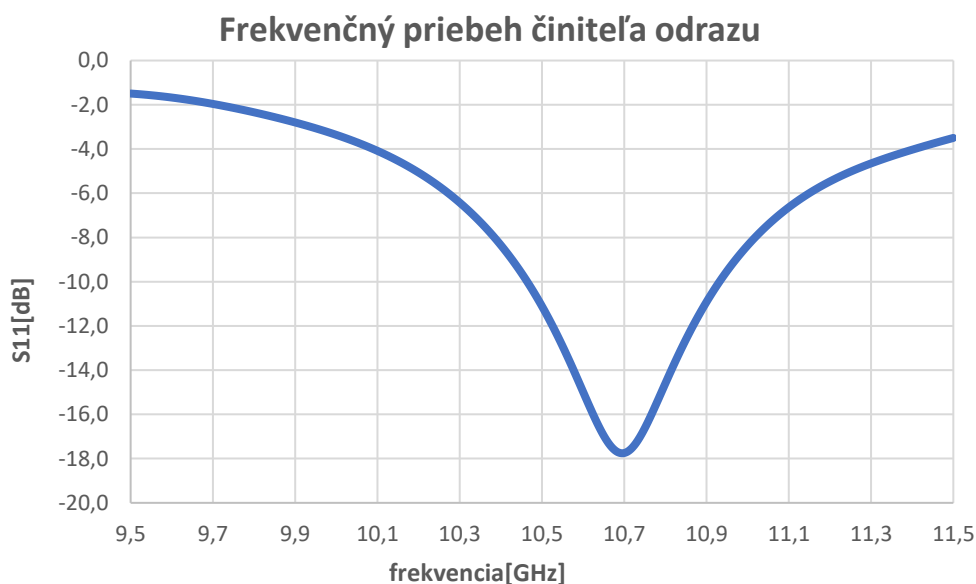
3 MODELOVANIE A SIMULÁCIE

Pre overenie správnosti výpočtov a návrhu je vhodné dané štruktúry namodelovať v niektorom z elektromagnetických simulátorov. Táto vizualizácia produktu môže pomôcť k ďalším estetickým úpravám a odsimulovanie zase k dôkladnejšiemu návrhu a optimalizácii. Pri tejto bakalárskej práci bol použitý modelovací program CST Microwave Studio.

3.1 Realizácia antény

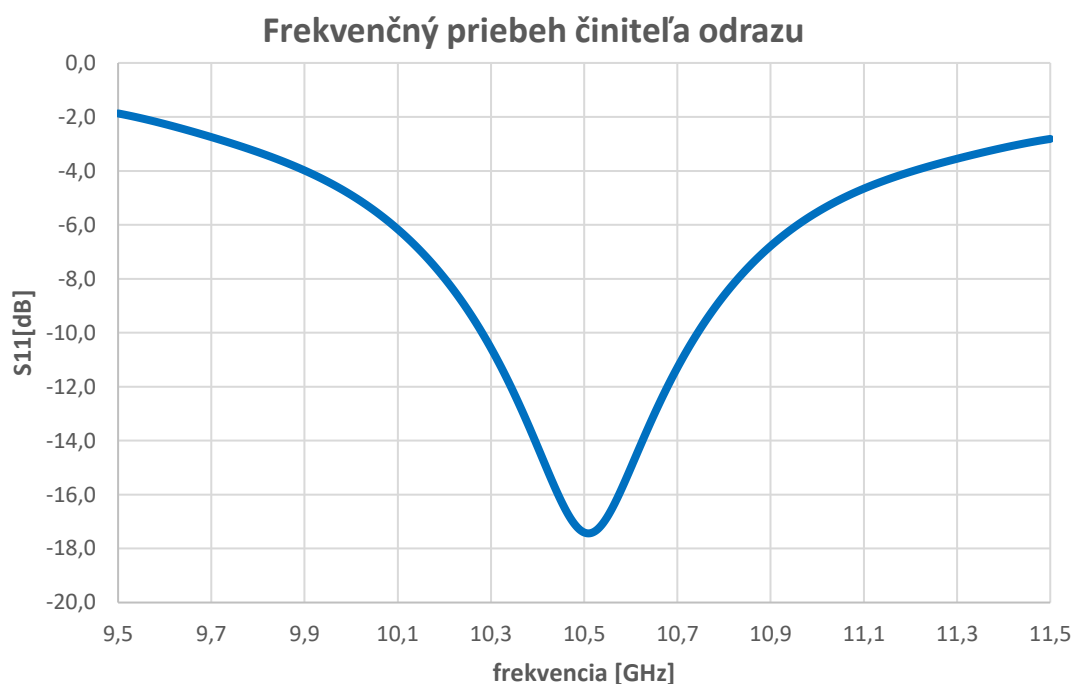
Pri prvotnom modelovaní antény je vhodné držať sa teoretického návrhu a teda hodnôt rozmerov, ktoré boli vypočítané vzhľadom k zadanej pracovnej frekvencii a taktiež k použitému substrátu a ich súhrn je možné nájsť v Tabuľka 2.1.1. V teoretickom návrhu neboli ešte spomenuté dva podstatné parametre a to zapustenie mikropásku (anglicky *feed-inset*, viz. Obrázok 1.1.1) a medzera medzi anténou a zapustenou časťou mikropásku (anglicky *inset-spacing*). Tieto dva rozmery neboli počítane ale z teórie antén je známe, že mikropásik by mal byť zapustený až do miesta, kde má anténa charakteristickú impedanciu napájacieho mikropásku. Tento krok slúži k impedančnému prispôbeniu antény k napájaciemu mikropásku, čo eliminuje ďalšie prispôbovacie elementy (napr. kondenzátor) [3]. Parameter *inset-spacing* bol následne zvolený na 0,5mm.

Po namodelovaní anténneho prvku bol prvok odsimulovaný a výstupný parameter pre určenie správneho fungovania antény je činiteľ odrazu (viz. Obrázok 3.1.1). Tento parameter je vyjadrovaný v decibeloch [dB] a v grafoch zobrazovaný v závislosti na frekvencii.

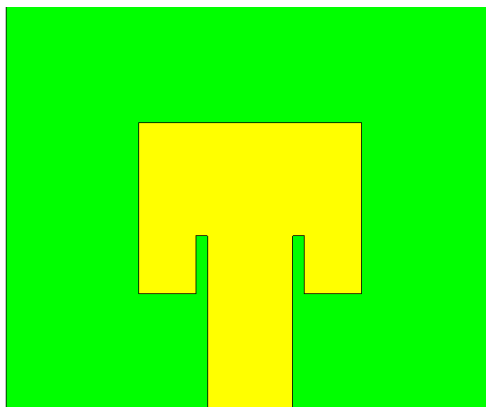


Obrázok 3.1.1 Činiteľ odrazu prvého návrhu antény

Z grafu (viz. Obrázok 3.1.1) je zrejme, že anténa nie je prispôbená správne. Rezonančná frekvencia je posunutá asi o 200 MHz a teda anténa rezonuje približne na frekvencii 10,7 GHz, kde jej činiteľ odrazu má najnižšiu úroveň -17,75 dB a jej približná šírka pásma je 400 MHz. Za vyhovujúci činiteľ odrazu sa dajú považovať hodnoty pod úrovňou -10 dB, ktorú sme si určili ako hraničnú, čo teda znamená, že z tohto hľadiska je výsledok uspokojivý, no je potrebné doladiť pracovný kmitočet. Z časti 1.1 je známe, že pracovnú frekvenciu ovplyvňuje dĺžka antény. Preto bola použitá parametrická analýza parametru L (dĺžka) antény pre určenie ideálnej hodnoty. Po odsimulovaní je možné skonštatovať, že najvhodnejšou hodnotou je $L=7,41\text{ mm}$, čo bolo určené podľa príslušného grafu činiteľa odrazu (viz. Obrázok 3.1.2). Finálny model antény je na Obrázok 3.1.3 a zhrnutie jeho rozmerov je možné nájsť v Tabuľka 3.1.1.



Obrázok 3.1.2 Činiteľ odrazu záverečného návrhu antény

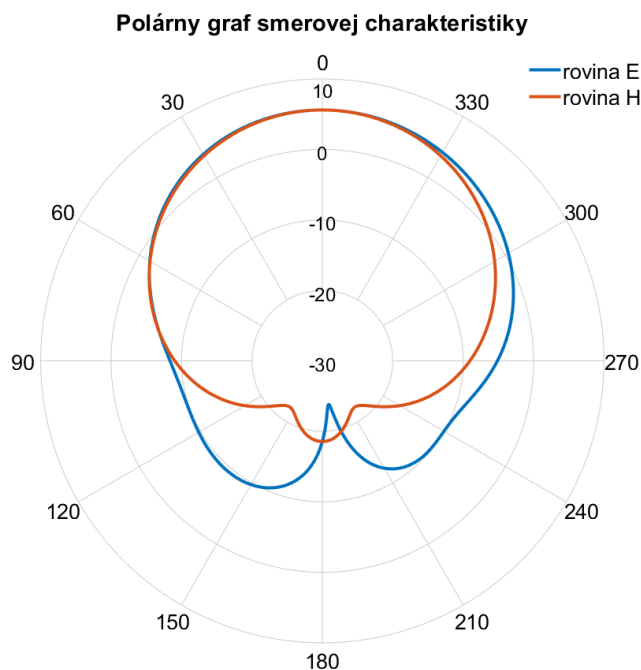


Obrázok 3.1.3 Výsledný model anténneho prvku

Tabuľka 3.1.1 Rozmery výsledného modelu antény

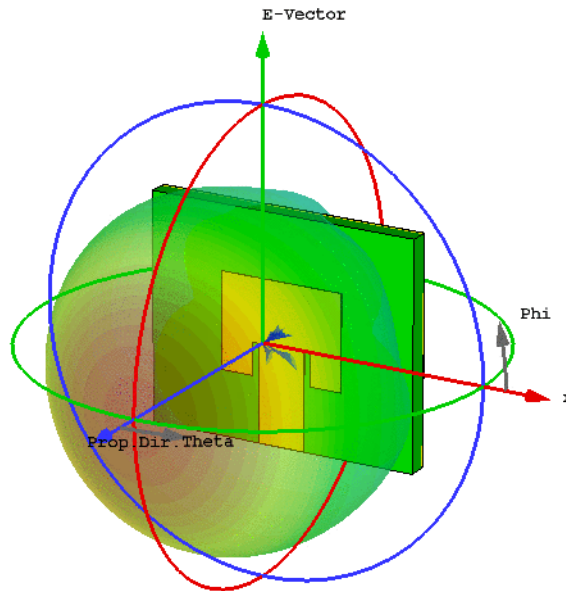
Parameter	Hodnoty
W (mm)	9,65
L (mm)	7,41
w (mm)	3,526
feed-space (mm)	0,5
feed-inset (mm) (od stredu antény)	1,2

Pri tejto dĺžke antény je rezonančná frekvencia 10,51 GHz, úroveň činiteľa odrazu je približne -17,4 GHz a šírka pásma 450 MHz, čo znamená, že bolo dosiahnuté požadovaných parametrov. Ďalej bol skontrolovaný graf vyžarovacej charakteristiky (viz. Obrázok 3.1.4), ktorú je v programe CST možné nájsť v záložke *farfield* a po nastavení *linear* je možné, v záložke *Copolar*, zobrazit' reálny zisk a tvar tejto charakteristiky. *Copolar* je zložka absolútneho zobrazenia reálneho zisku, ktorá je rovnobežná s rovinou E a je pri návrhu žiadanou zložkou, naopak zložka *Crosspolar* reprezentuje zložku rovnobežnú s rovinou H a v snahe návrhára by mala byť jej eliminácia [8]. Taktiež bol zobrazený 3D graf vyžarovacej charakteristiky (viz. Obrázok 3.1.5). Pri porovnaní grafov Obrázok 3.1.1 a Obrázok 3.1.2 je možné si všimnúť, že frekvenčne sa model posunul na nižšiu, požadovanú, hodnotu no činiteľ odrazu, u ktorého je požadovaná čo najnižšia hodnota, sa mierne zvýšil. Na nižšie hodnoty by teoreticky bolo možné model doladiť správnou optimalizáciou parametra *feed-inset* a to postupným zvyšovaním jeho hodnoty, čo by mohlo naopak negatívne ovplyvniť rezonančný kmitočet a posunúť ho na nižšiu úroveň. Tento spomínaný rozdiel je pre túto prácu zanedbateľný, keďže je úroveň činiteľa odrazu v oboch prípadoch ďaleko pod - 10 dB, takže ďalšia optimalizácia nebude potrebná.



Obrázok 3.1.4 Graf smerovej charakteristiky antény rovín E a H (zložka *Copolar*)

Z grafu (viz. Obrázok 3.1.4) môžeme vyčítať tzv. šírku hlavného laloku. Táto šírka, udávaná v stupňoch a známa aj ako vyžarovací uhol, je oblasť okolo smeru s najvyššou úrovňou vyžarovania, kde táto úroveň neklesne o viac ako 3 dB oproti maximálnej úrovni žiarenia [9]. V prípade tejto antény je v rovine E maximálna úroveň hlavného laloku 5,59 dB a šírka hlavného laloku je $74,3^\circ$. V rovine H nadobúda anténa rovnakú úroveň maximálneho zisku taktiež 5,59 dB, no hlavný lalok je o niečo širší, konkrétne 82° .



Obrázok 3.1.5 Vyžarovacia charakteristika antény

3.2 Modelovanie výkonového deliča s rovnomerným delením výkonu

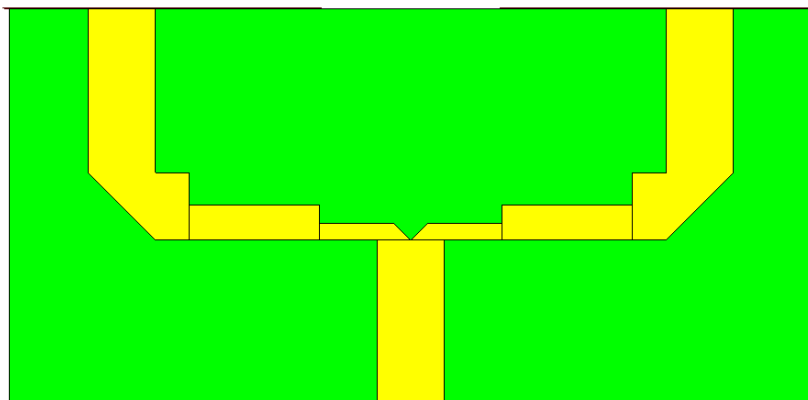
3.2.1 Prvotný návrh

V tomto bode sa bude opäť model deliča navrhovať podľa vypočítaných hodnôt z časti 2.2, kde ich zhrnutie je možné nájsť v Tabuľka 2.2.1. V tejto tabuľke ešte chýbajú dĺžky dvoch mikropáskov, a to z dôvodu, že zatiaľ neboli vypočítané. Ich dĺžky boli volené vzhľadom k rozmerom anténneho poľa. Konkrétne je to dĺžka mikropásku s impedanciou $50\ \Omega$ (parameter l_{50}) a $100\ \Omega$ (parameter l_{100}).

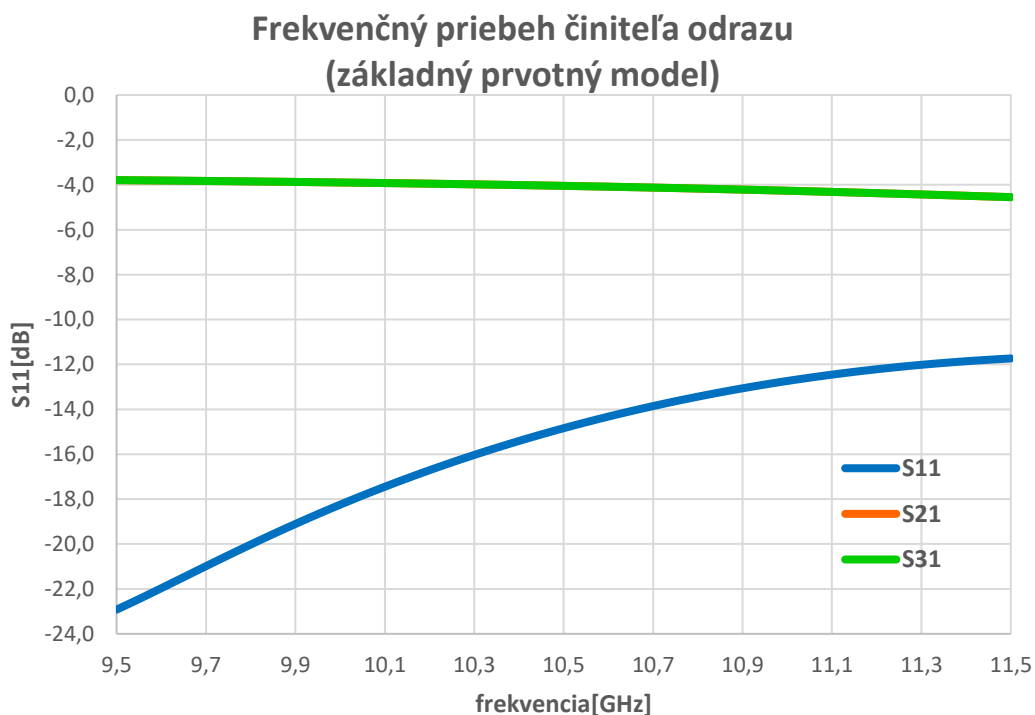
Parameter l_{50} bol zvolený približne rovnaký ako napájací mikropásik antény a teda $l_{50} = 9\text{ mm}$. Na tento mikropásik boli ďalej namodelované dve ramená o impedancii $100\ \Omega$, u ktorých sme dĺžku zvolili iba predbežne 6 mm , tak, aby bolo možné medzi l_{50} a l_{100} vložiť štvrt'-vlnné transformátory, keďže v časti 1.2 je poznamenané, že tento rozmer môže byť ľubovoľný. Ďalšie úpravy tohto parametra budú realizované podľa potreby.

Následne boli ďalším modelovaním na tieto ramená pripojené štvrt'-vlnné transformátory o presne vypočítanej dĺžke a nakoniec boli pridané opäť mikropásiky o impedancii $50\ \Omega$, z ktorých bola vymodelovaná aj tzv. rohová časť ramena. Tieto rohové časti boli skosené približne o šírku príslušného mikropásku, čo bolo dosiahnuté experimentálnymi

úpravami. Rovnaký krok bol realizovaný aj u mikropásku s impedanciou $100\ \Omega$ a to v mieste pripojenia na $50\ \Omega$. Po zhotovení prototypu deliča boli nastavené vstupný a oba výstupné porty (viz. Obrázok 3.2.1) a model bol odsimulovaný (viz. Obrázok 3.2.2).



Obrázok 3.2.1 Model prvotného návrhu výkonového deliča



Obrázok 3.2.2 Činiteľ odrazu a prenosu základného modelu deliča

Pri pozorovaní výsledkov (viz. Obrázok 3.2.2) je podstatná účinnosť deliča. Podľa zvoleného typu popísaného v časti 1.2, bude na výstupoch (porty 2 a 3) očakávaný, v ideálnom prípade, maximálne polovičný činiteľ prenosu (parametre S_{21} a S_{31}), čo znamená, že na pracovnej frekvencii bude ideálne $S_{21}, S_{31} = -3\ \text{dB}$ a opäť hodnota činiteľa odrazu ideálne $S_{11} \leq -10\ \text{dB}$. V tomto grafe sú viditeľné iba dve krivky, to z dôvodu, že činitele prenosu S_{21} a S_{31} nadobúdajú takmer rovnakých hodnôt. Znamená

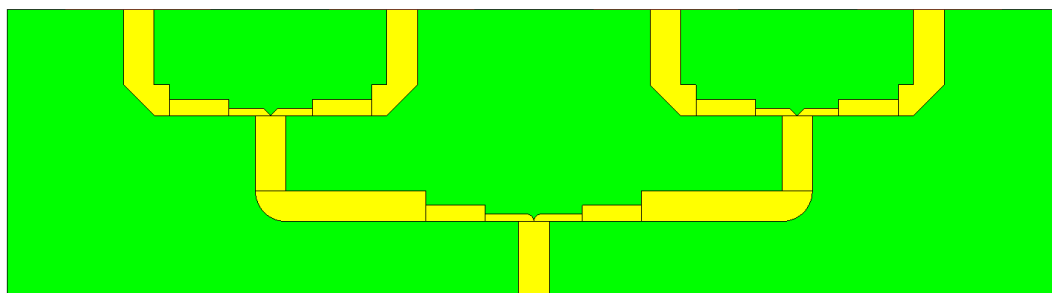
to, že navrhnutý delič pracuje podľa teoretických predpokladov a teda rozdeľuje výkon do oboch ramien rovnakým dielom. Podľa týchto výsledkov boli teoretické požiadavky splnené a následne výsledné rozmery zhrnuté v Tabuľka 3.2.1.

Tabuľka 3.2.1 Zoznam výsledných rozmerov prvotného základného deliča

Parameter	Hodnoty
W_{50}	3,688
$W_{70,7}$	1,945
W_{100}	0,908
l_{50} (priamy)	9,0
$l_{70,7}$	7,14
l_{100}	5,00
l_{50} (pred rohovou časťou)	1,84

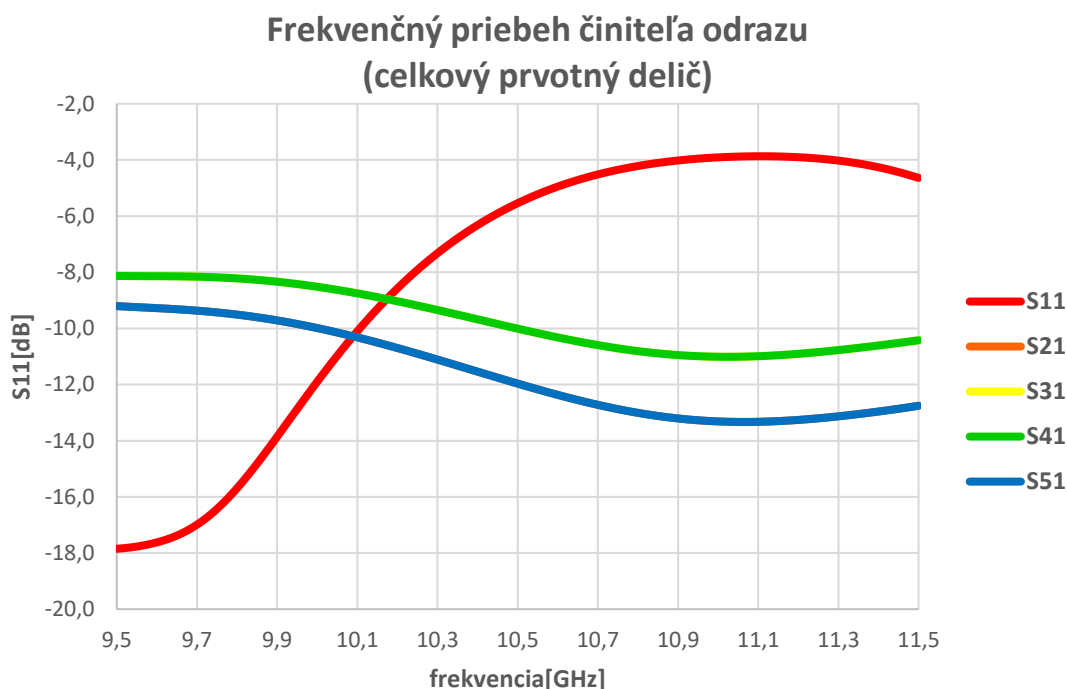
Po odladení základného deliča bol model prekopírovaný a posunutý paralelne tak, aby bola dodržaná rovnaká vzdialenosť medzi anténami. Tieto dva deliče boli spojené rovnakým spôsobom ako boli spojené výstupy na tom základnom. Na vstupy základných deličov boli kolmo namodelované časti $50\ \Omega$ vedení, ďalej štvrt-vlnné vedenia a nakoniec vedenia s impedanciou $100\ \Omega$. Pripojené boli opäť na vedenie o impedancii $50\ \Omega$, čo je v konečnom dôsledku vstup celkového deliča.

Pri ladení celkového deliča, bola kontrolované šírenie elektromagnetických vln v ramenách deliča, čo sa v programe CST Microwave studio dá zobrazit' v časti *e-field* a po zakliknutí *Animate* bolo možné pozorovať, či vzniká nejaké stojaté vlnenie, čo by spôsobovalo odrazy. V snahe bolo teda eliminovať tento jav, čo bolo možné dosiahnuť ladením pomeru dĺžok mikropáskov v prvej "T" časti deliča, konkrétne dĺžky l_{50} (pred zlomom) a l_{100} tak, aby bola zachovaná celková vzdialenosť medzi anténami. Rovnako bolo v tejto časti upravené skosenie na zaoblenie (viz. Obrázok 3.2.3).



Obrázok 3.2.3 Kompletný prvotný návrh deliča bez vyžarovacích prvkov

V poslednom kroku bol opäť do grafu vynesенý činiteľ odrazu (viz. Obrázok 3.2.4).



Obrázok 3.2.4 Činiteľ odrazu celkového prvotného deliča

V grafe (viz. Obrázok 3.2.4) sú prekryté krivky S51 s S21 a krivky S41 s S31. Najviac štvrtinový výkon na výstupoch (činiteľ prenosu ideálne rovný -6 dB) bol síce v tomto prípade dosiahnutý, no činiteľ odrazu sa nepodarilo doladiť pod úroveň -10 dB a činitele prenosu nenadobúdajú rovnakých hodnôt. Táto odchýlka môže byť spôsobená nepresným odladením pomeru l_{50} a l_{100} . Tento model celkového rovnomerného deliča teda nespĺňa teoretické predpoklady, a preto je potrebné ho ešte ďalej modifikovať.

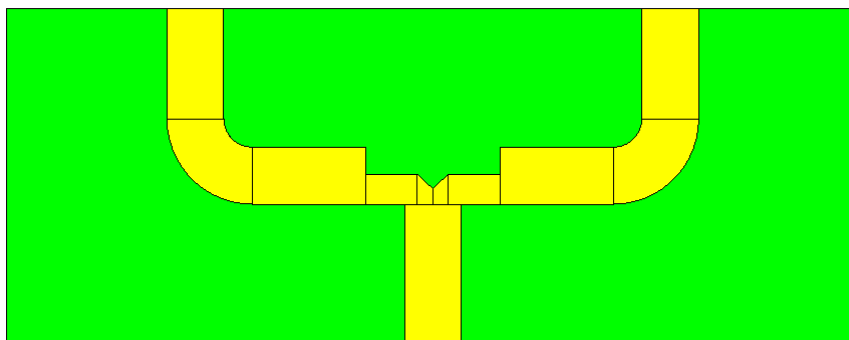
3.2.2 Prepracovaný model

Vzhľadom k tomu, že prvotný návrh rovnomerného deliča nedosahoval vyhovujúcich výsledkov, bolo potrebné tento delič prepracovať.

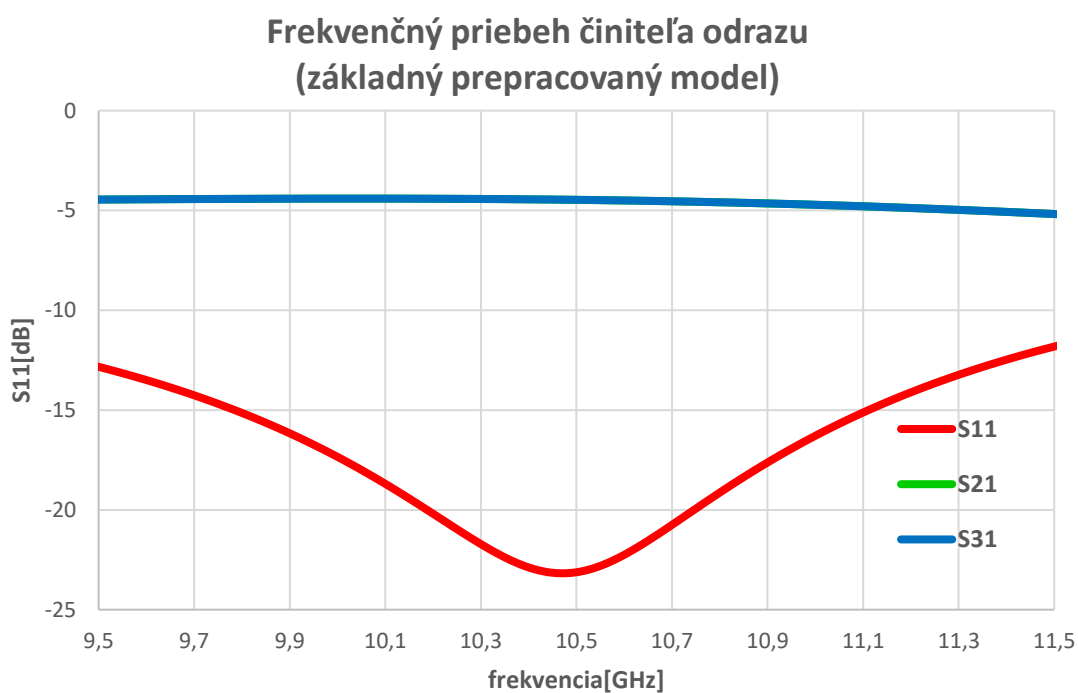
V prvom rade je potrebné ozrejmiť, že všetky šírky mikropáskov boli zachované. Návrh vychádzal z prvého modelu deliča, no boli odstránené mikropásiky o impedancii 100 Ω . Ďalej boli odstránené všetky ostré hrany a nehomogenity, pretože boli identifikované ako možné zdroje problémov ako sú napríklad odrazy. Jednou z úprav bolo aj vytvorenie skosenia transformátorov v mieste napojenia na vstupný mikropásik. Následne bola predĺžená horizontálna časť tohto vedenia tak, aby bola zachovaná vzdialenosť medzi jednotlivými výstupmi a zároveň anténnymi prvkami, čo je jednou z podmienok pri návrhu nerovnomerného deliča Dolph-Chebyshevovu metódou, a to z dôvodu, že boli odstránené vedenia s impedanciou 100 Ω .

Po odsimulovaní a zhodnotení výsledkov bol navrhnutý ďalší krok, overenie dĺžky štvrt'-vlnného transformátora jednoduchou parametrickou analýzou. Pri tomto kroku bola postupne menená dĺžka transformátora a v časti *e-field* bolo kontrolované, či dochádza k odrazom podobne ako u predošlého modelu. Z výsledkov bol zvolený ten najvhodnejší, ktorý bol dosiahnutý pre hodnotu $l_{70,7} = 4,35\text{mm}$.

Výsledný model a jeho činiteľ odrazu je možné vidieť na Obrázok 3.2.5 a Obrázok 3.2.6.



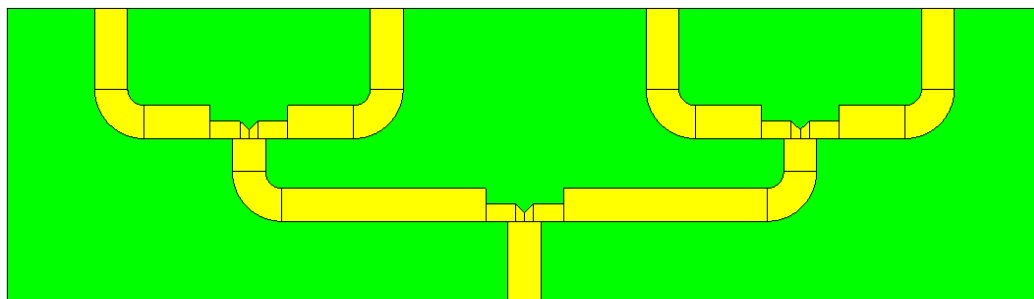
Obrázok 3.2.5 Jednoduchý prepracovaný rovnomerný delič



Obrázok 3.2.6 Graf činiteľa odrazu prepracovaného rovnomerného deliča

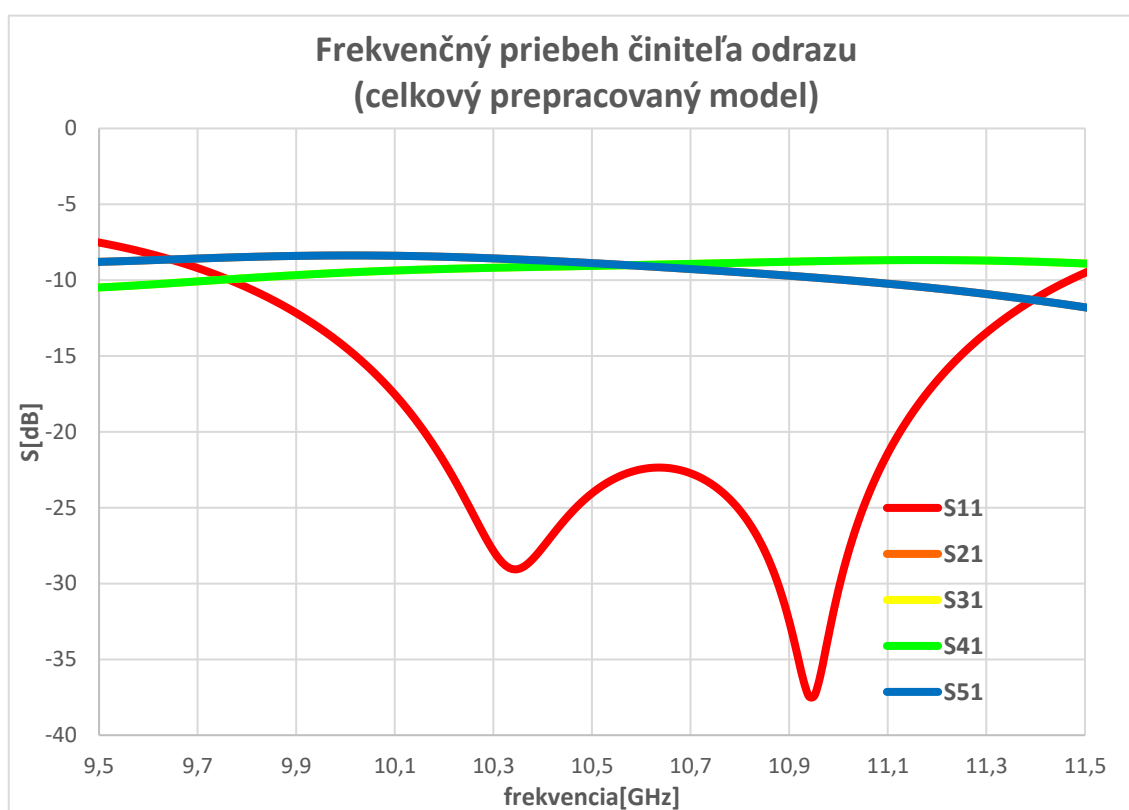
Už v tomto bode je možné si všimnúť, že bolo dosiahnuté zlepšenie, nakoľko tento model nadobúda v okolí rezonančnej frekvencie najnižšie hodnoty v porovnaní s predošlým modelom (viz. Obrázok 3.2.2).

Následne bol vytvorený celkový rovnomerný delič podobným spôsobom ako v prvej verzii a to skopírovaním a posunutím jednoduchého deliča. Rozdiel je hlavne v skrátení napájania týchto jednoduchých deličov a vzdialenosť medzi nimi bola zachovaná prispôbením dĺžky vedenia s impedanciou $50\ \Omega$ v primárnej časti delenia tak, aby transformátory boli napojené priamo na napájací mikropásik (viz. Obrázok 3.2.7).



Obrázok 3.2.7 Prepracovaný model celkového rovnomerného deliča

Po odsimulovaní bol zobrazený činiteľ odrazu a činitele prenosu (viz. Obrázok 3.2.8)

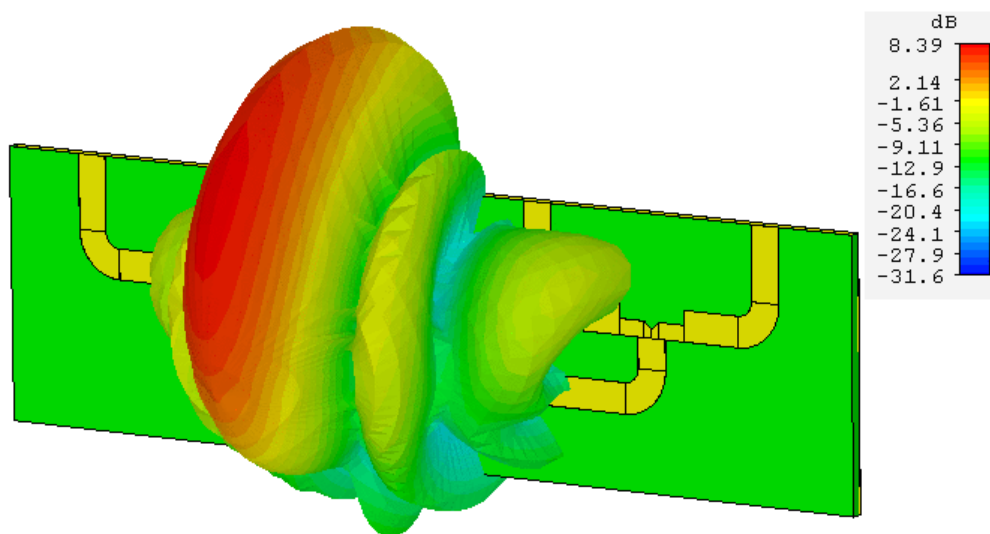


Obrázok 3.2.8 Graf činiteľa odrazu a prenosu celkového prepracovaného rovnomerného deliča

Z výsledok je zrejmé, že tento model dosahuje lepších výsledkov ako prvotný model, a to ako pri činiteli odrazu, kde dosahuje hodnoty nižšie ako -10 dB v rozmedzí približne 9,8 GHz až 11,4 GHz, tak aj u činiteľov prenosu, ktoré sa na rezonančnej frekvencii líšia približne o 0,2 dB, čo môžeme považovať za akceptovateľné výsledky.

Keďže S-parametre boli zhodnotené ako vyhovujúce, boli skontrolované ďalšie parametre a to animácia *e-field*, kde bolo overené, že pri šírení elektromagnetických vln nedochádza k odrazom a následne bol zobrazený 3D graf vyžarovacej charakteristiky (viz. Obrázok 3.2.9) aby bolo možné overiť parazitné vlastnosti deliča. Na obrázku je taktiež stupnica, ktorá určuje úroveň vyžarovania deliča, a jej maximum dosahuje hodnoty 8,39 dB, čo pre delič nie je optimálne. Tieto vysoké hodnoty môžu byť

spôsobené parazitným vyžarovaním deliča. Preto je tento model vhodné ešte ďalej modifikovať za účelom znížiť tieto hodnoty.



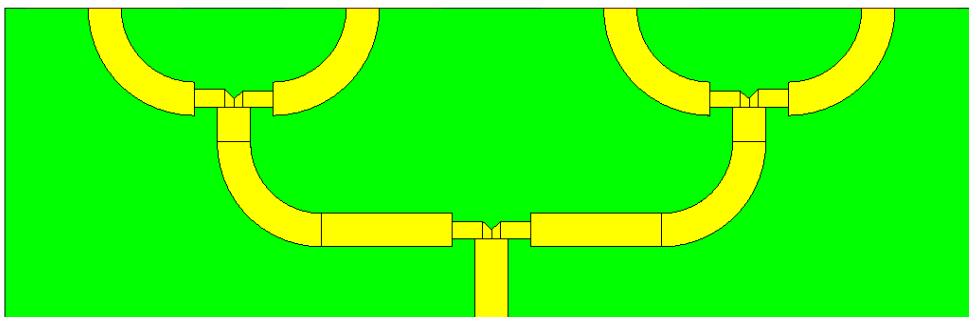
Obrázok 3.2.9 Vyžarovacia charakteristika prepracovaného celkového deliča

3.2.3 Optimalizovaný model

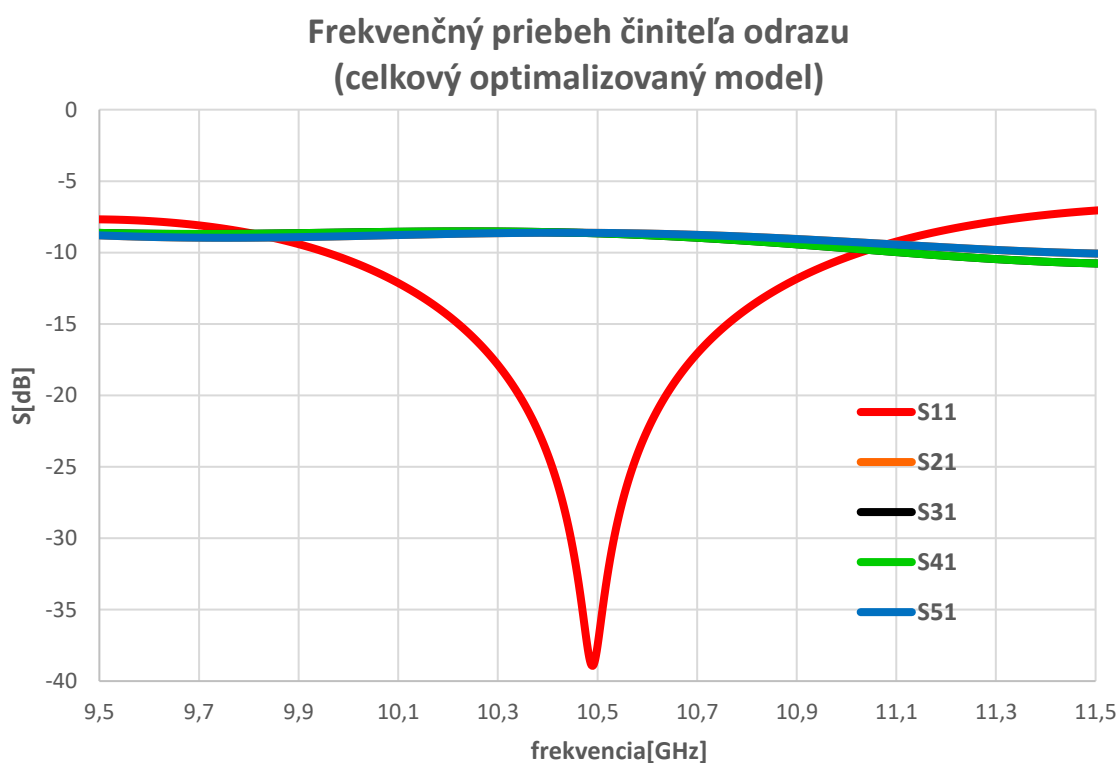
Po zhodnotení posledných výsledkov druhej verzie rovnomerného deliča je zrejmé, že sú potrebné ďalšie úpravy. Dostávame sa teda k tretej verzii deliča s rovnomerným rozdelením výkonu na ramenách no tentokrát bude upravovaný iba celkový delič.

Vzhľadom k tomu, že dochádza k parazitnému vyžarovaniu deliča, jednou z možností je rozšíriť vzdialenosť medzi vnútornými výstupnými ramenami a ramenami v časti primárneho delenia výkonu. To bolo docielené tak, že boli odstránené priame časti výstupných ramien a od štvrt'-vlnných transformátorov až po samotné výstupy boli vytvorené zaoblenia rovnako ako vo verzii dva, no s takým polomerom aby bola zachovaná vzdialenosť medzi jednotlivými výstupmi. Takýmto krokom boli upravené aj ramena v primárnej časti delenia, čím bolo dosiahnuté ďalšie zväčšenie spomínanej vzdialenosti. Taktiež boli upravené vedenia s impedanciou $50\ \Omega$ v primárnej časti delenia výkonu tak, aby bola opäť zachovaná vzdialenosť medzi jednotlivými deličmi.

Pre doladenie činiteľov prenosu bol upravený deliaci pomer výkonu na výstupoch a to nastavením rôznych širok vonkajších a vnútorných transformátorov. To bolo dosiahnuté tak, že v lineárnom zobrazení činiteľov prenosu boli na frekvencii 10,5 GHz odčítané ich úrovne. Týmto krokom bolo zistené, ktoré šírky transformátorov je potrebné zmenšiť a ktoré zväčšiť. Transformátory pripojené na vonkajšie ramená, ktoré nadobúdali nižších hodnôt bolo potrebné rozšíriť a naopak transformátory napojené na vnútorné ramená bolo potrebné zúžiť. Výsledné šírky transformátorov boli získané parametrickou analýzou tak, že jednotlivé rozmery boli menené nepriamo úmerne o rovnakú hodnotu. Finálny model je možné vidieť na Obrázok 3.2.10 a výsledný graf činiteľov odrazu a prenosu je na Obrázok 3.2.11.

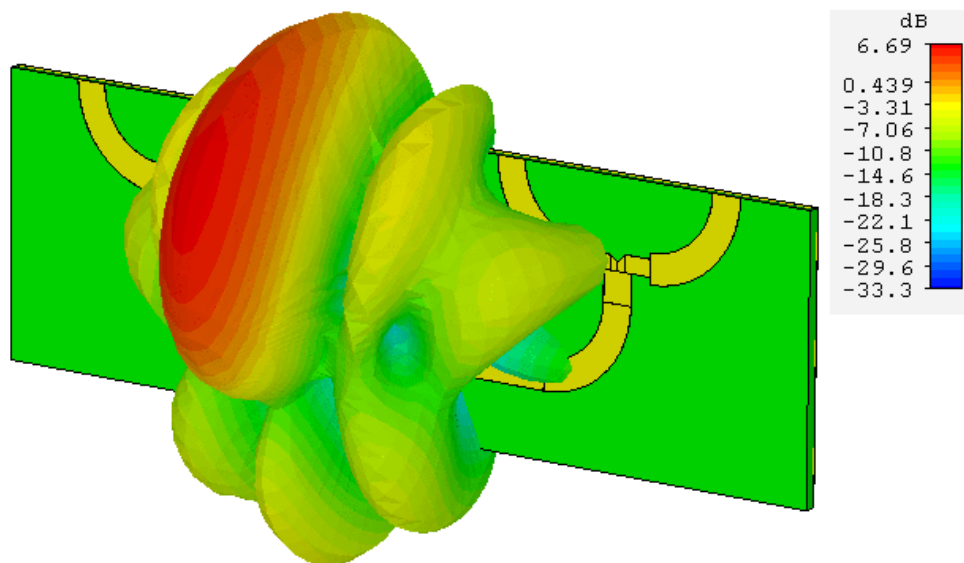


Obrázok 3.2.10 Optimalizovaný model celkového rovnomerného deliča



Obrázok 3.2.11 Graf činiteľov odrazu prenosu celkového optimalizovaného rovnomerného deliča

Z grafu je zrejmé, že všetky činitele prenosu nadobúdajú na rezonančnej frekvencii rovnakých hodnôt, presne ako bolo požadované a v porovnaní s prepracovaným návrhom delič vykazuje menšiu šírku pásma a lepšiu symetriu voči pracovnej frekvencii. Následne bol opäť zobrazený 3D graf vyžarovacej charakteristiky na Obrázok 3.2.12.



Obrázok 3.2.12 Vyžarovacia charakteristika celkového prepracovaného rovnomerného deliča

Po porovnaní stupnice z Obrázok 3.2.9 je zrejmé, že bolo dosiahnuté nižšej úrovne vyžarovania deliča a to o približne 1,7 dB, čo bolo cieľom tejto modifikácie. Tento model deliča s rovnomerným rozdelením výkonu bude považovaný ako finálny a bude neskôr použitý pri návrhu celkového anténneho poľa.

3.3 Delič s nerovnomerným delením výkonu

Po tom ako bol úspešne navrhnutý a odladený rovnomerný delič, je možné pokračovať s návrhom deliča nerovnomerného. Tento delič sa bude líšiť hlavne v modifikácií štvrtvlnných transformátorov v bode sekundárneho delenia výkonu.

V časti 2.3 boli vypočítané všetky potrebné parametre a boli určené aj výsledné šírky transformátorov, no do úvahy nebola vzatá modifikácia rovnomerného deliča, preto je to potrebné dopočítať.

Zo vzťahu (viz. Rovnica 1.1.8) bol vyjadrený parameter a , vypočítaný podľa príslušnej šírky transformátora a následne vypočítaná ich impedancia podľa vzťahov (Rovnica 1.1.8, Rovnica 1.3.9 a Rovnica 1.3.11):

$$w_{OUT/IN} = h \frac{8\exp(a)}{\exp(2a)-2},$$

$$a_{OUT} = 1,8178,$$

$$Z_{\lambda/4OUT} = 67,91 \Omega,$$

$$a_{IN} = 1,9539,$$

$$Z_{\lambda/4 IN} = 73,43 \, \Omega,$$

Rovnica 3.3.1 Výpočet pomocného parametru a a impedancie príslušných transformátorov

Následne je možné určiť východzie impedancie, ktoré mali pôvodne impedanciu $100 \, \Omega$ a to zo vzťahu Rovnica 1.2.2, kde $Z_q = Z_{\lambda/4 OUT/IN}$ a $Z_1 = 50 \, \Omega$:

$$Z_q = \sqrt{Z_1 Z_2},$$

$$Z_{2OUT} = \frac{Z_{\lambda/4 OUT}^2}{Z_1} = \frac{61,91}{50} = 92,255 \, \Omega$$

$$Z_{2IN} = \frac{Z_{\lambda/4 in}^2}{Z_1} = \frac{73,43}{50} = 107,86 \, \Omega$$

Rovnica 3.3.2 Výpočet impedancie Z_2

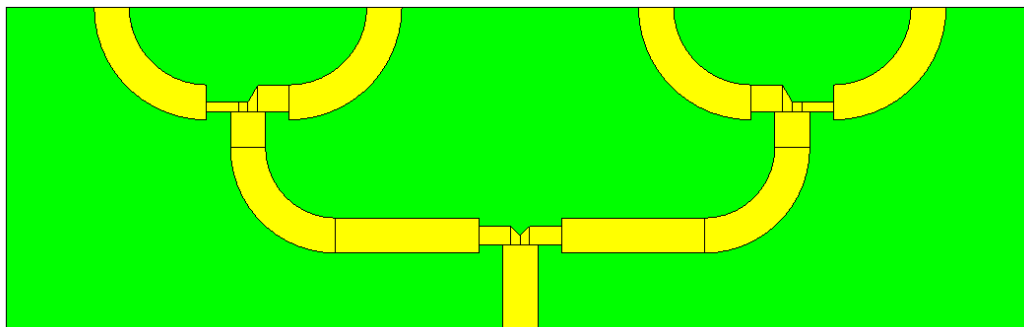
Pomocou týchto impedancií budú vypočítané konštanty, ktorými budeme následne násobiť vypočítané váhy. Tieto konštanty sú odchýlky od pôvodnej hodnoty $100 \, \Omega$ a teda ich hodnoty sú 0,92255 a 1,0786.

Za použitia týchto konštánt určíme výsledné váhy ich vynásobením a za použitia vzťahov Rovnica 2.3.9 až Rovnica 2.3.17 sa dopracujeme až k šírkam jednotlivých transformátorov. Všetky dôležité parametre sú zhrnuté v Tabuľka 3.3.1.

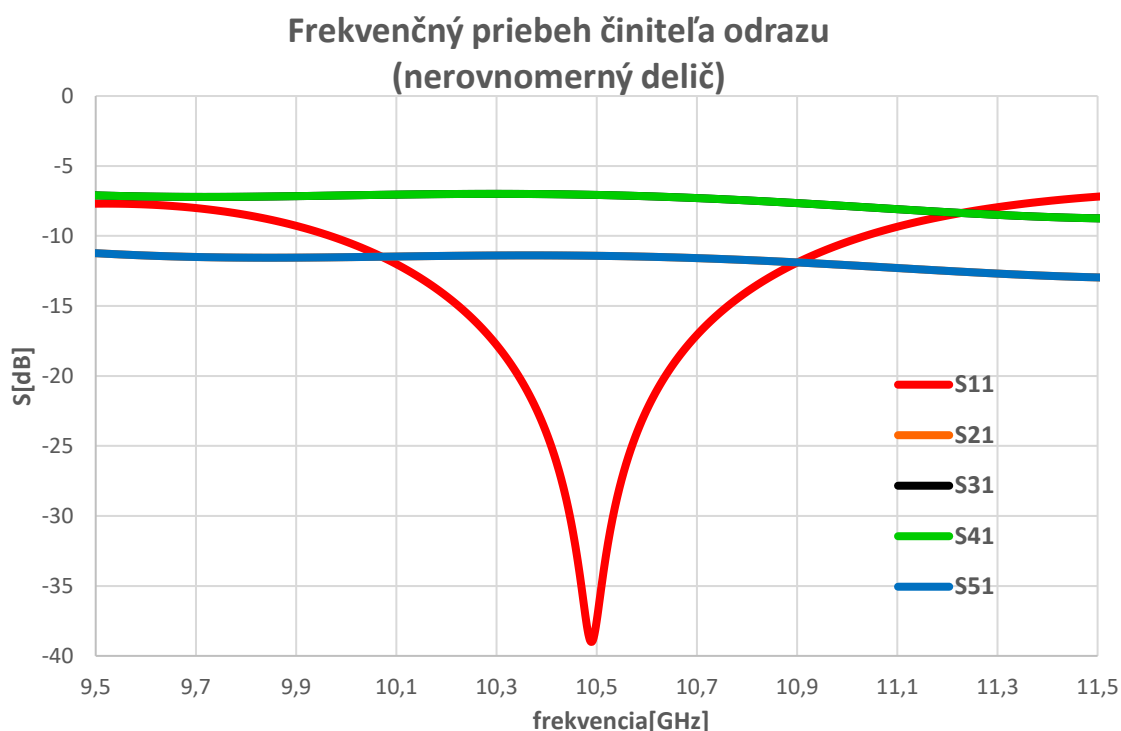
Tabuľka 3.3.1 Zhrnutie prepočítaných parametrov transformátorov pre delič s nerovnomerným rozdelením výkonu

Parameter	Hodnota
W_{OUT}	8,7592
W_{IN}	23,8703
α	0,36695
$Z_{\lambda/4,OUT} (\Omega)$	96,51
$w_{96} (mm)$	0,9908
$Z_{\lambda/4,IN} (\Omega)$	58,46
$w_{58} (mm)$	2,7296

Po určení všetkých potrebných parametrov boli v modeli pozmenené šírky transformátorov a následne do grafu vynesené činitele odrazu a prenosu (viz. Obrázok 3.3.1 a Obrázok 3.3.2)

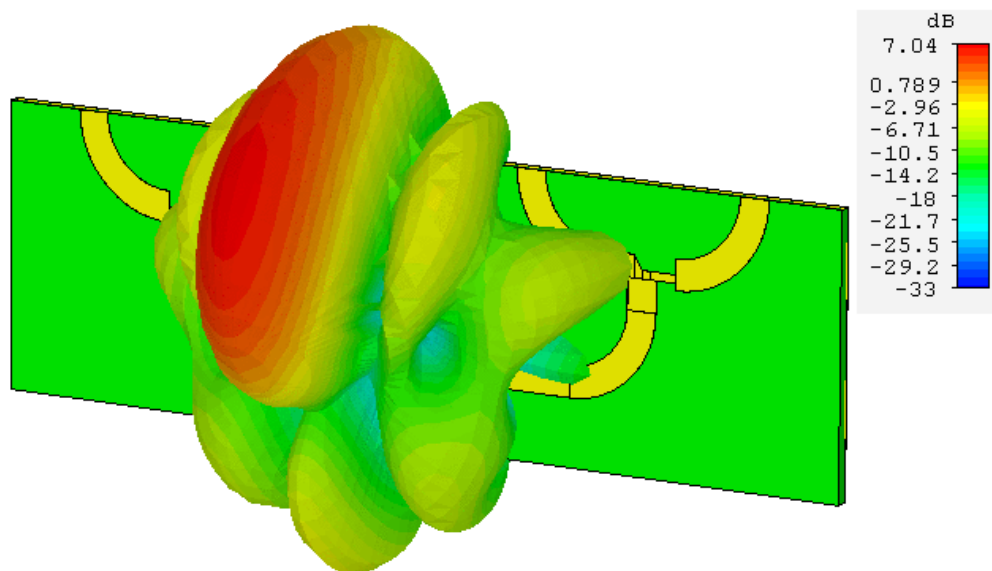


Obrázok 3.3.1 Delič s nerovnomerným delením výkonu



Obrázok 3.3.2 Činitele odrazu a prenosu nerovnomerného deliča v závislosti na frekvencii

Z grafu na Obrázok 3.3.2 je viditeľné, že bolo dosiahnuté nerovnomerné rozdelenie výkonu na výstupy. Rozdiel medzi vonkajšími a vnútornými ramenami na rezonančnej frekvencii je približne 4,4 dB, no pre kontrolu správnosti návrhu boli odčítané hodnoty činiteľov prenosu v lineárnom zobrazení a tieto hodnoty sú 0,2686 a 0,4432. Po ich umocnení, aby sme z napäťového činiteľa prenosu získali výkonový, a vzájomnom podelení získame hodnotu 0,3673. Pre kontrolu správnosti návrhu porovnáme túto hodnotu s konštantou α z Tabuľka 3.3.1 a ich rozdiel je približne $3,2 \cdot 10^{-4}$, teda návrh môžeme považovať ako vyhovujúci. Na koniec bol zobrazený 3D graf vyžarovacej charakteristiky (viz. Obrázok 3.3.3).



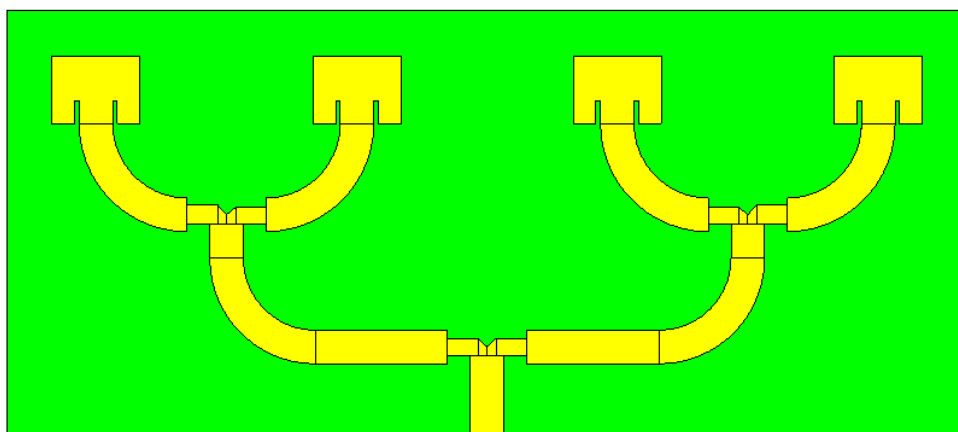
Obrázok 3.3.3 Vyžarovacia charakteristika nerovnomerného deliča

Úroveň vyžarovania mierne vzrástla a to približne o 0,3 dB. Návrh modelu deliča s nerovnomerným delením výkonu môžeme zhodnotiť ako dokončený a tento model bude ďalej použitý pri návrhu celkovej štruktúry.

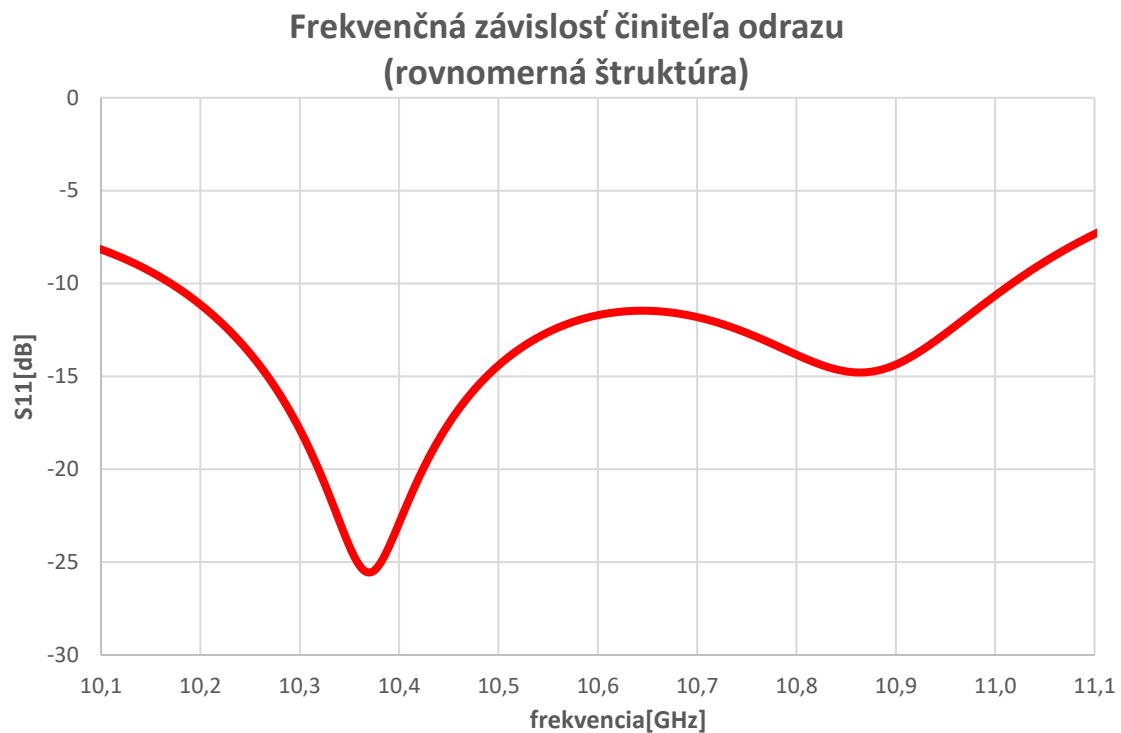
3.4 Modelovanie štruktúry s rovnomerným deličom

Návrh celkovej rovnomernej štruktúry spočíva v pripojení anténnych prvkov na výstupy deliča s rovnomerným delením výkonu a prispôbení veľkostí substrátu a zemniacej plochy. Prečnievajúca časť substrátu a zemi bola zvolená na 5 mm od anténnych prvkov.

Po namodelovaní štruktúry (viz. Obrázok 3.4.1) bol model odsimulovaný a všetky potrebné výsledky boli následne zhodnotené a zobrazené (viz. Obrázok 3.4.2 až Obrázok 3.4.4).



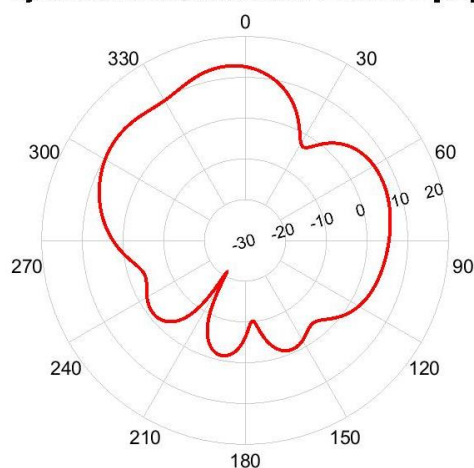
Obrázok 3.4.1 Model štruktúry s rovnomerným rozložením výkonu na anténnych prvkoch



Obrázok 3.4.2 Činiteľ odrazu štruktúry s rovnomerným rozložením výkonu na elementoch

Úroveň činiteľa odrazu pre rovnomernú štruktúru (viz. Obrázok 3.4.2) je na pracovnej frekvencii takmer -15 dB a šírka frekvenčného pásma je pre tento model približne 900 MHz.

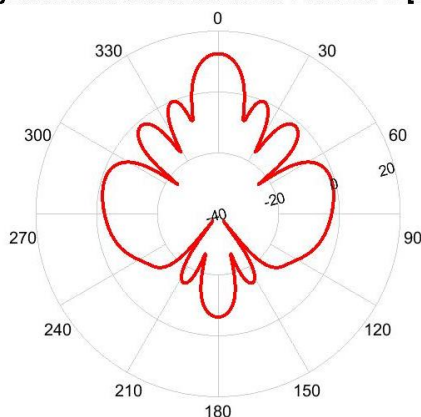
Vyžarovacia charakteristika v rovine E [dB]



Obrázok 3.4.3 Vyžarovacia charakteristika rovnomernej štruktúry v rovine E

Maximálna hodnota zisku štruktúry v rovine E s rovnomerným rozložením výkonu na elementoch je, podľa Obrázok 3.4.3 zo simulácie, približne 13 dB a šírka hlavného laloku je 37,1°.

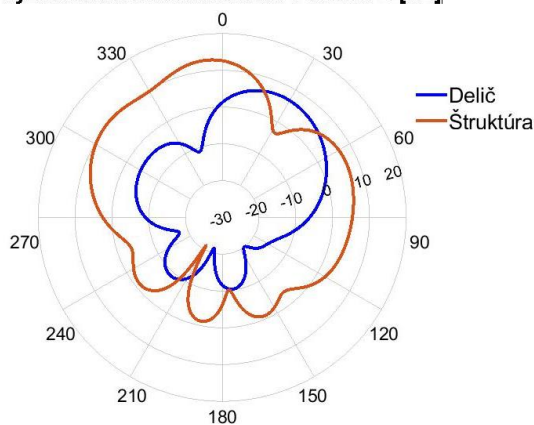
Vyžarovacia charakteristika v rovine H [dB]



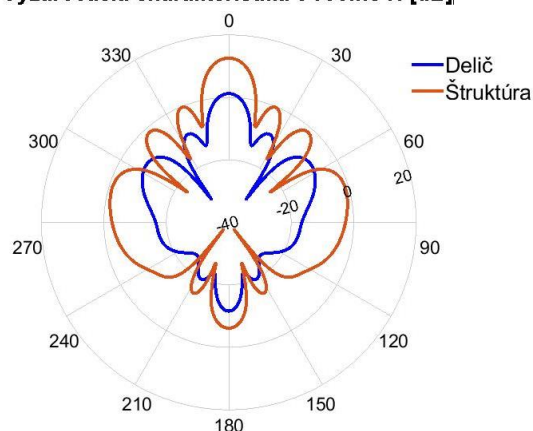
Obrázok 3.4.4 Vyžarovacia charakteristika rovnomernej štruktúry v rovine H

Úroveň hlavného laloku v rovine H a zároveň zisk je 12,6 dB (viz. Obrázok 3.4.4) a jeho šírka je v tejto rovine 13,7°. Ďalším dôležitým parametrom je odstup medzi hlavným lalokom a bočnými lalokmi. Priemerná hodnota odstupov bočných lalokov od hlavného je 13,7 dB. Tieto hodnoty budú ešte v ďalšej časti práce porovnané s úrovňou postranných lalokov modelu s nerovnomerným rozdelením výkonu.

Vyžarovacia charakteristika v rovine E [dB]

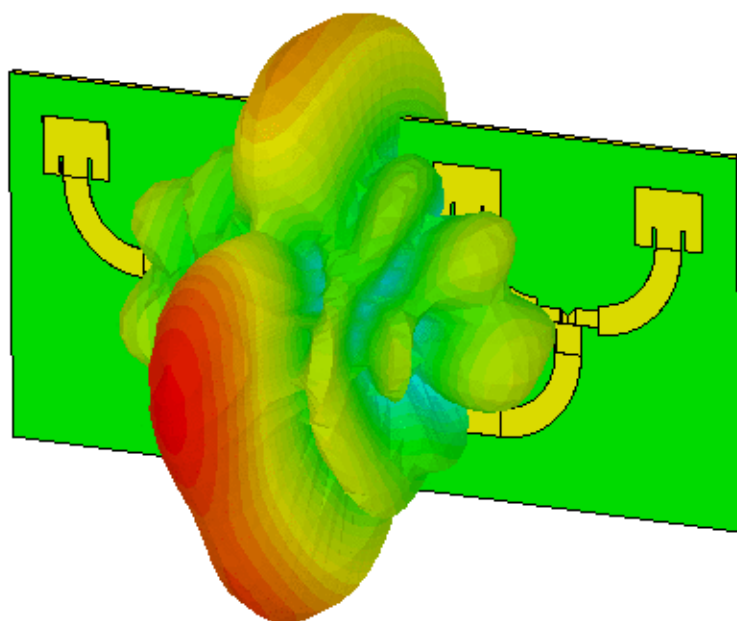


Vyžarovacia charakteristika v rovine H [dB]



Obrázok 3.4.5 Porovnanie vyžarovacích charakteristík deliča a štruktúry pre obe roviny

Na záver boli doplnené grafy (viz. Obrázok 3.4.5) pre porovnanie vyžarovacích charakteristík deliča a štruktúry v oboch rovinách, kde je badateľnejší rozdiel úrovní vyžarovania. Taktiež bol zobrazený 3D graf vyžarovacej charakteristiky (viz. Obrázok 3.4.6).

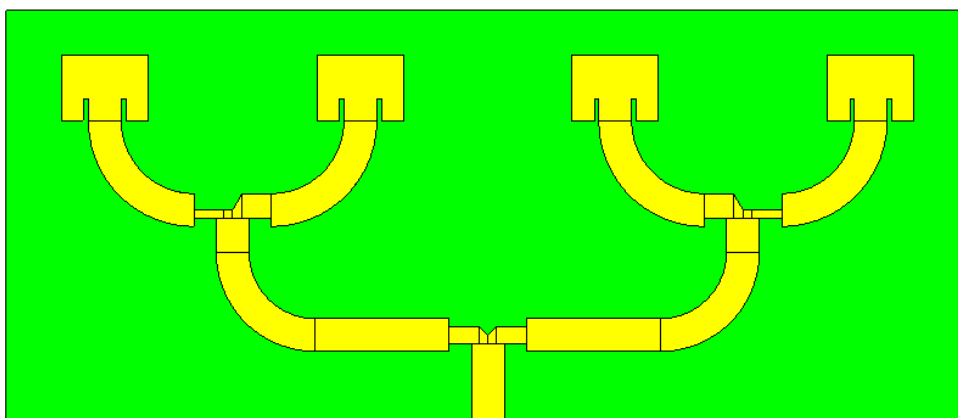


Obrázok 3.4.6 Vyžarovacia charakteristika rovnomernej štruktúry

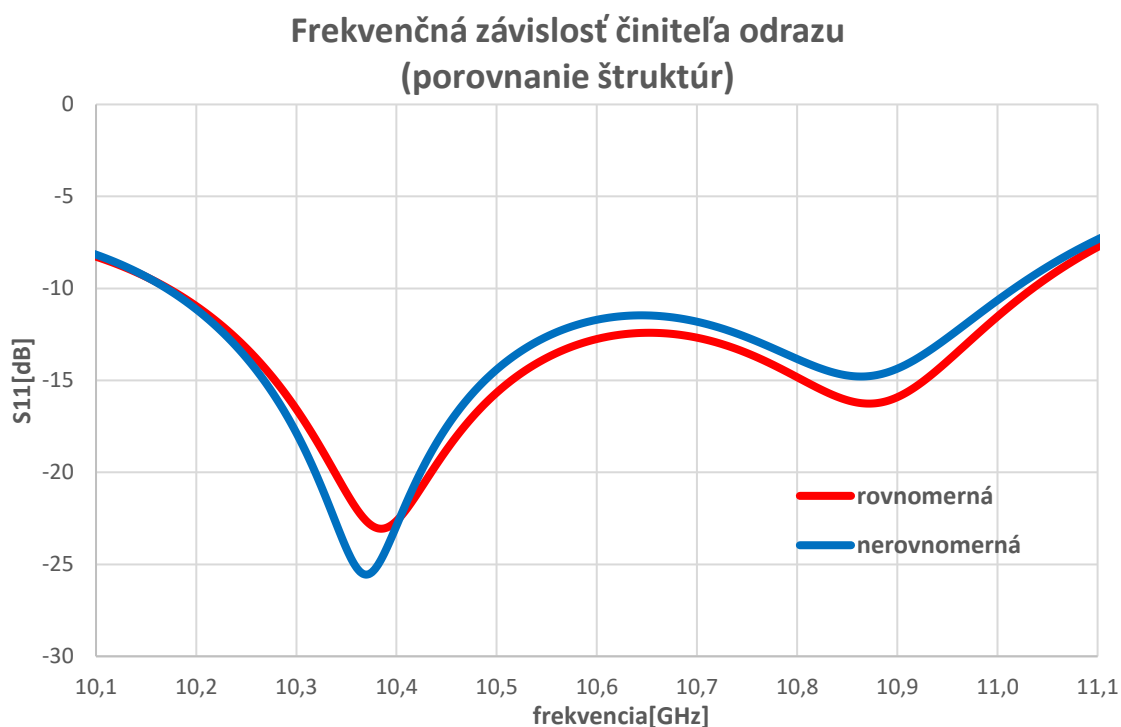
3.5 Pole s nerovnomerne deleným výkonom na elementoch

Pri návrhu štruktúry s nerovnomerným delením výkonu bolo postupované rovnakým spôsobom ako pri návrhu rovnomernej štruktúry. Anténne prvky boli pripojené na všetky štyri výstupy nerovnomerného deliča a model bol odsimulovaný.

Výsledný model môžeme vidieť na Obrázok 3.5.1 a výsledky simulácií porovnané v grafoch s rovnomernou štruktúrou na Obrázok 3.5.2 až Obrázok 3.5.4.

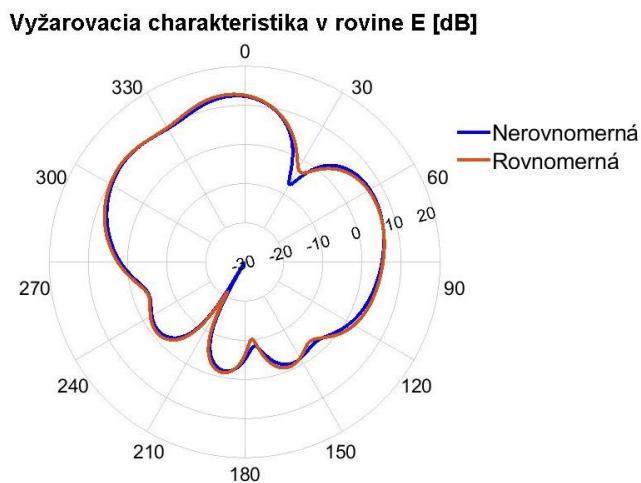


Obrázok 3.5.1 Štruktúra s nerovnomerným rozdelením výkonu na elementoch



Obrázok 3.5.2 Graf činiteľov odrazu simulovanej rovnomernej a nerovnomernej štruktúry

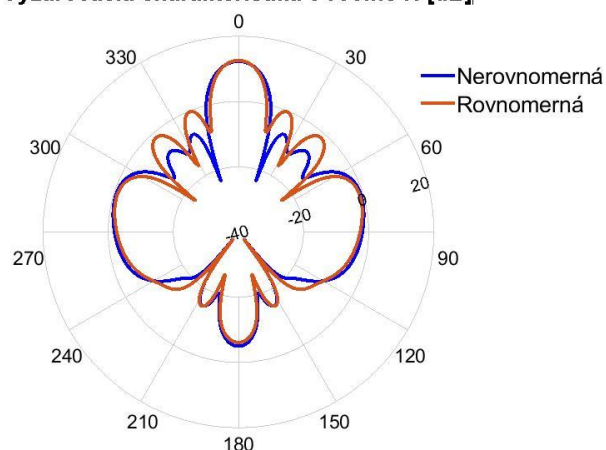
Z Obrázok 3.5.2 je viditeľné, že činitele odrazu oboch typov štruktúr sú takmer totožné, no nerovnomerná štruktúra nadobúda, na frekvencii približne 10,35 GHz, nižších hodnôt ako štruktúra rovnomerná. Rozdiely sú však minimálne a preto zanedbateľné.



Obrázok 3.5.3 Vyžarovacia charakteristika v rovine E pre oba typy štruktúr

Z Obrázok 3.5.3 je opäť zrejmé, že v rovine E nadobúdajú obe štruktúry takmer totožných hodnôt. Šírka hlavného laloku nerovnomernej štruktúry je 37,6°, jeho maximálna úroveň je 12,5 dB a smer 4°.

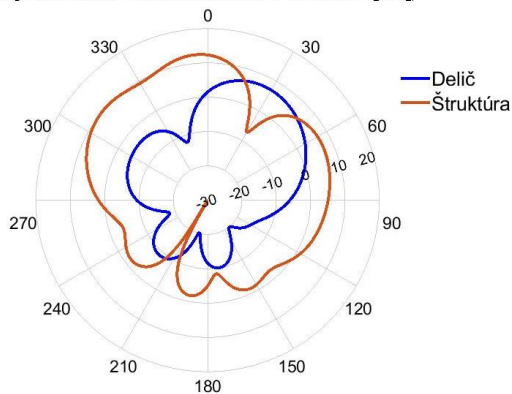
Vyžarovacia charakteristika v rovine H [dB]



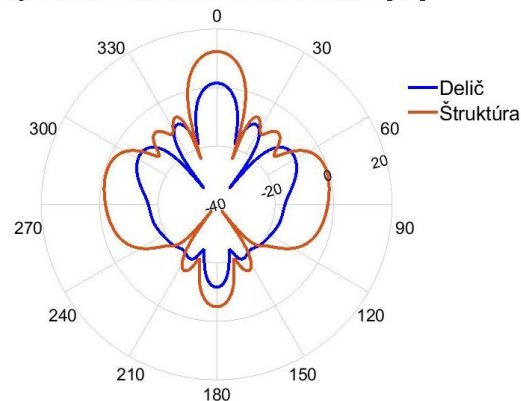
Obrázok 3.5.4 Vyžarovacia charakteristika v rovine H pre oba typy štruktúr

V rovine H sa úroveň a šírka hlavného laloku nerovnomernej štruktúry opäť výrazne nezmenila, jeho úroveň (zisk) je 12,3 dB a šírka 15,5°. Viditeľný rozdiel nastáva u bočných lalokoch, kde bola úroveň viditeľne potlačená. Priemerná hodnota odstupov hlavného laloku od bočných je 19,8 dB a rozdiel odstupov rovnomernej a nerovnomernej štruktúry je približne 6,1 dB.

Vyžarovacia charakteristika v rovine E [dB]

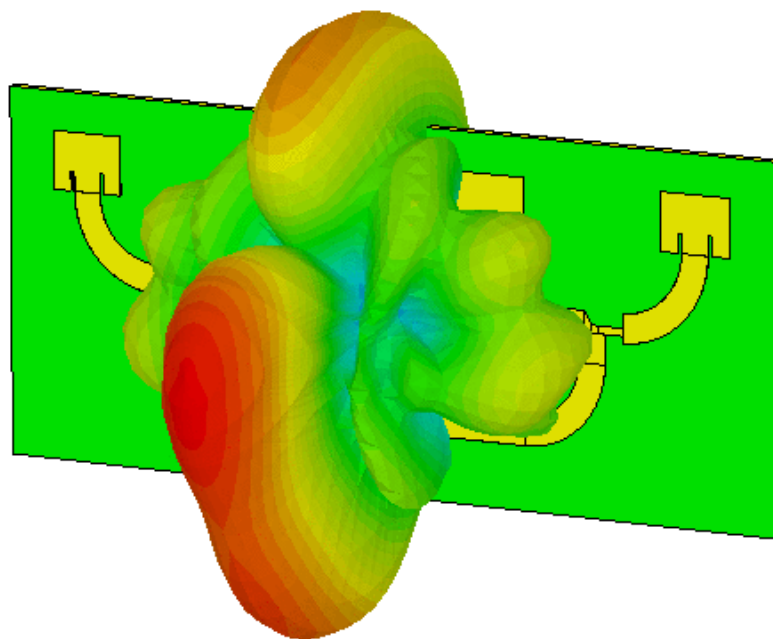


Vyžarovacia charakteristika v rovine H [dB]



Obrázok 3.5.5 Porovnanie vyžarovacích charakteristík v rovine E a H pre štruktúru a delič s nerovnomerným rozdelením výkonu

Opäť boli doplnené grafy pre porovnanie vyžarovacích charakteristík pre delič a štruktúru (viz. Obrázok 3.5.5) a na koniec 3D graf vyžarovacej charakteristiky štruktúry s nerovnomerným rozložením výkonu na elementoch (viz. Obrázok 3.5.6).



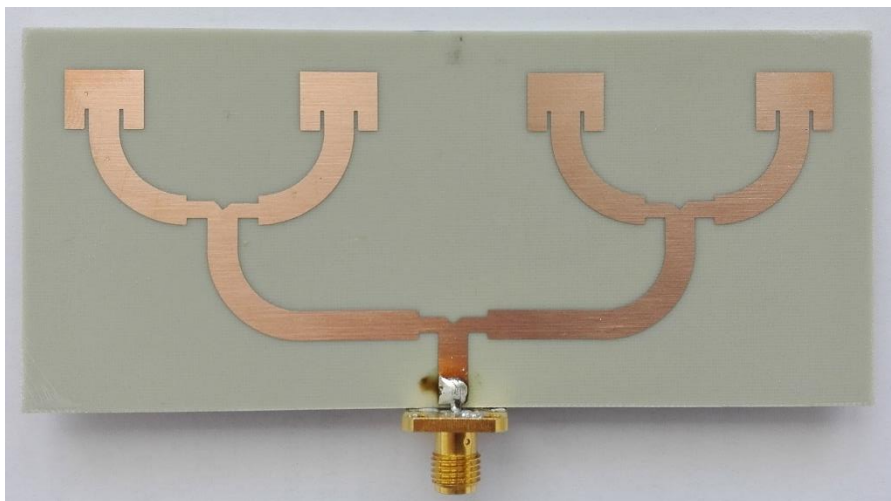
Obrázok 3.5.6 Vyžarovacia charakteristika nerovnomernej štruktúry

Tento model anténneho poľa s nerovnomerným rozložením výkonu na elementoch môžeme považovať za dokončený. Nasledujúca časť práce sa bude zaoberať výrobou týchto modelov a ich reálnymi hodnotami z meraní.

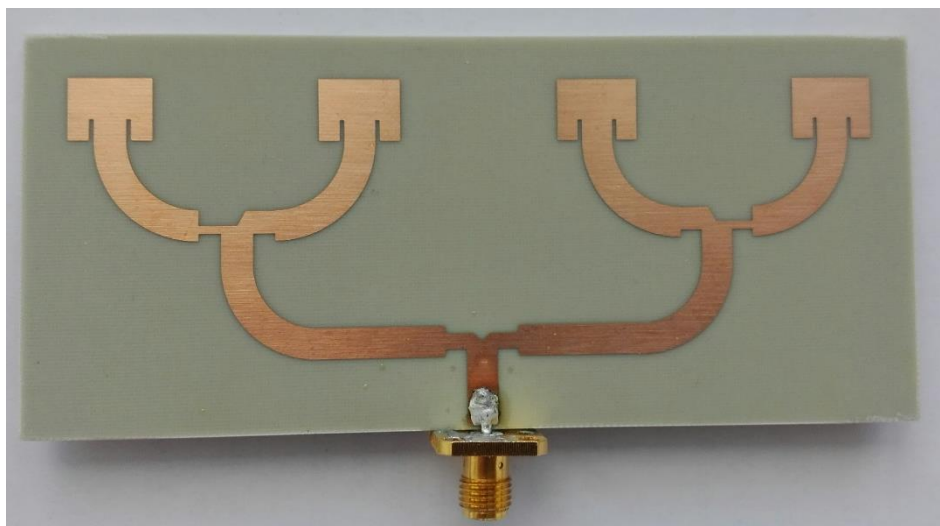
4 VÝROBA

V tejto kapitole je zhrnutá fotodokumentácia a výsledky meraní navrhnutých štruktúr.

Po vyrobení týchto štruktúr boli na vstupy prispájkované konektory SMA o impedancii $50\ \Omega$ a fotografie oboch štruktúr je možné vidieť na Obrázok 4.1 a Obrázok 4.2.

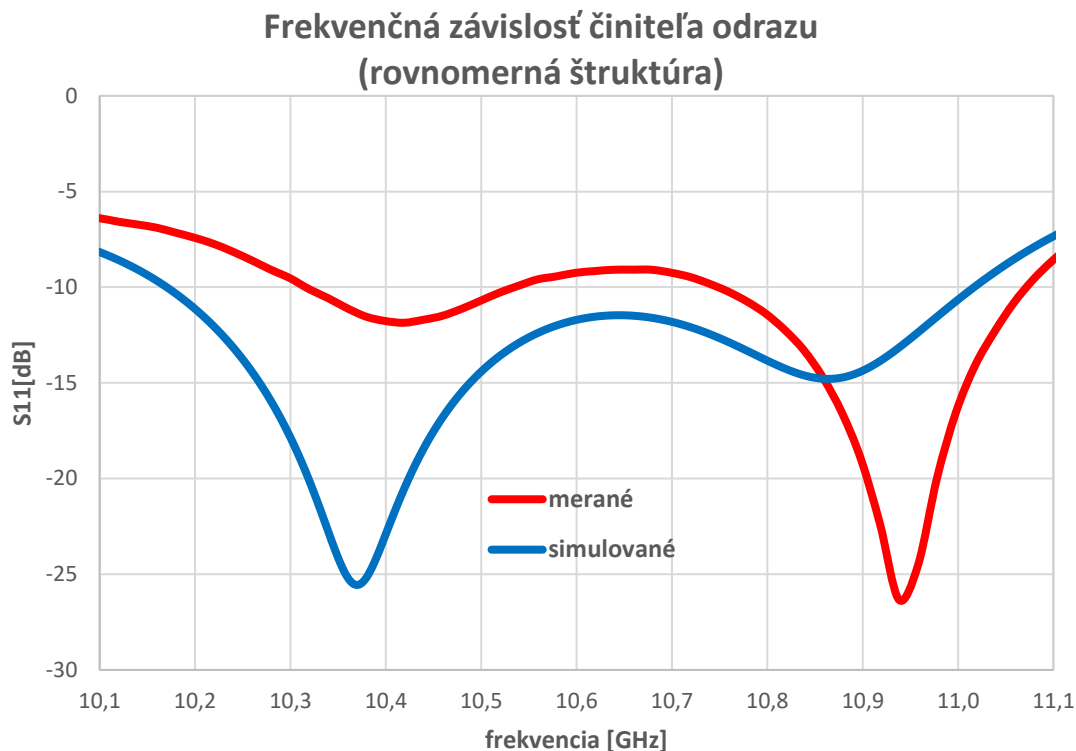


Obrázok 4.1 Vyrobená štruktúra s rovnomerným delením výkonu



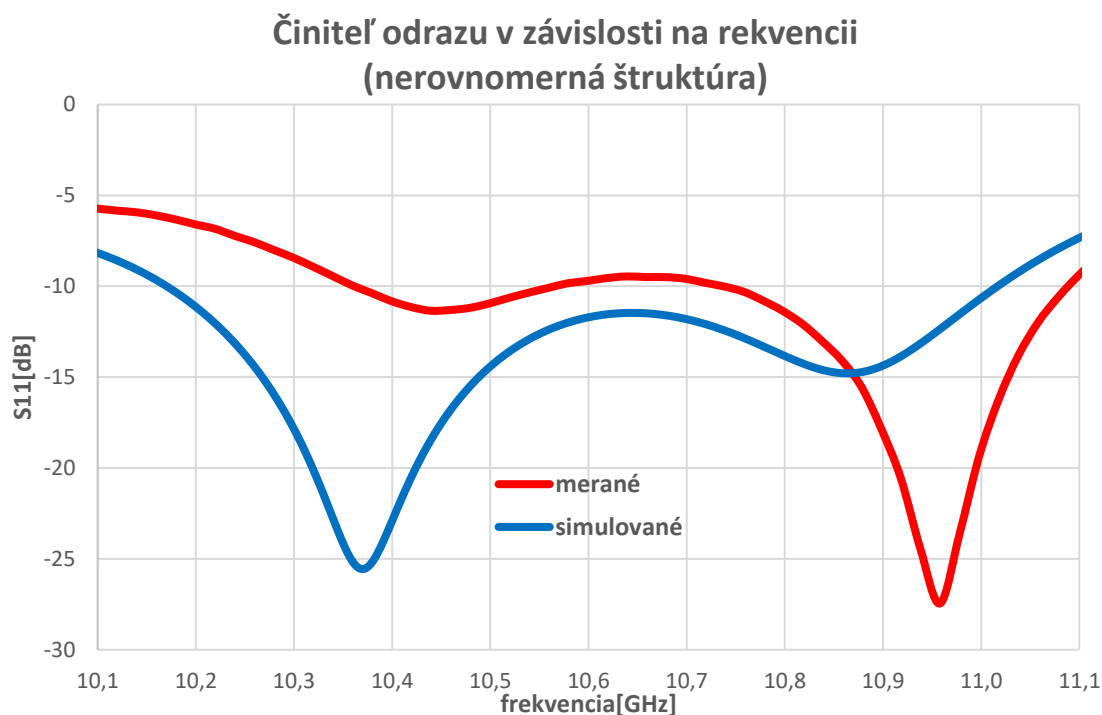
Obrázok 4.2 Vyrobená štruktúra s nerovnomerným delením výkonu

Za použitia vektorového analyzátora boli odmerané činitele odrazu oboch štruktúr a vynesené do grafov spolu s výsledkami zo simulácií (viz. Obrázok 4.3 a Obrázok 4.4).



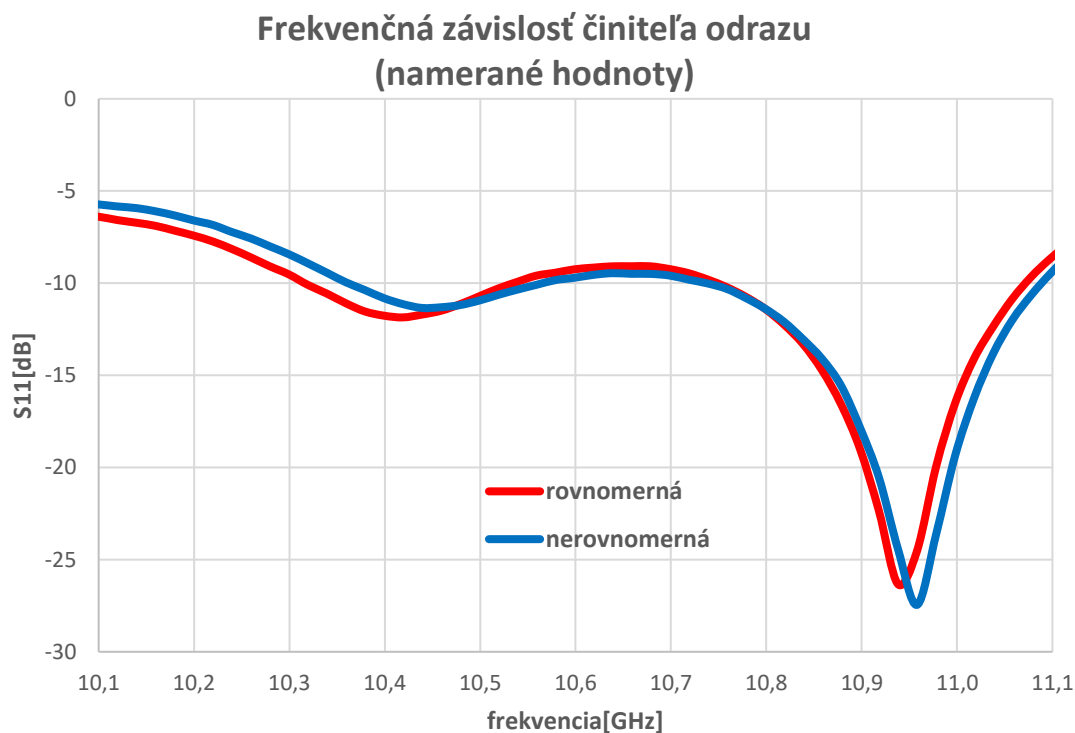
Obrázok 4.3 Porovnanie činiteľov odrazu reálnej a teoretickej rovnomernej štruktúry

Z grafu činiteľa odrazu pre rovnomernú štruktúru vyrobenú a simulovanú (viz. Obrázok 4.3) je viditeľný mierny nárast hodnôt činiteľa odrazu no na pracovnej frekvencii je úroveň činiteľa odrazu pod -10 dB a namerané výsledky vykazujú súlad so simuláciou, preto je možné tieto výsledky zhodnotiť ako vyhovujúce. Rozdiely medzi hodnotami zo simulácie a merania mohlo spôsobiť to, že pri simulácii nebol k vstupu modelu pridaný model konektoru, že SMA konektor nebol dokonalé prispájkovaný alebo mohlo nedopatrením dôjsť k znečisteniu povrchu štruktúry. Taktiež jedným z dôvodov môže byť aj fakt, že hodnoty relatívnej permitivity a stratového činiteľa, ktoré sú použité v tejto práci ($\epsilon_r = 3,38$ a $tg \delta = 0,0025$), sú udávané pre frekvenciu 10 GHz a nie pre 10,5 GHz.



Obrázok 4.4 Činiteľ odrazu simulovaný a meraný pre nerovnomernú štruktúru

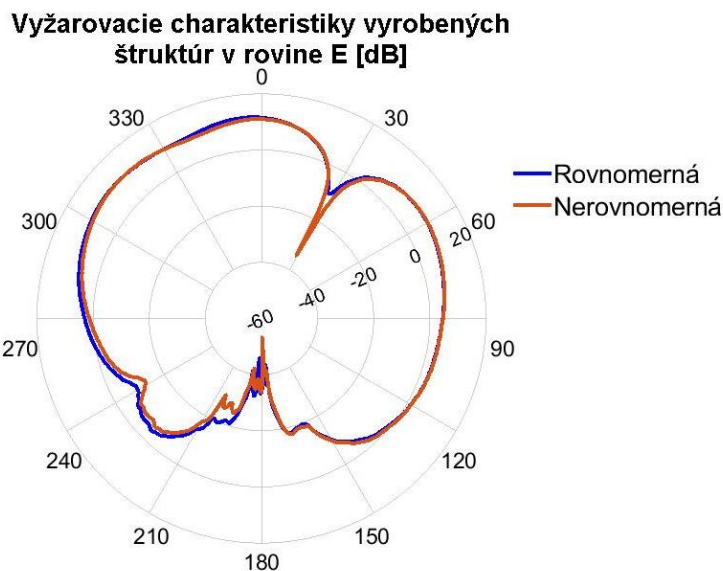
Opäť je zrejmé, že došlo k nárastu hodnôt činiteľa odrazu a k miernemu frekvenčnému posunu a to približne o 0,1 GHz. Zdroje týchto odchýlok sú pravdepodobne rovnaké ako u predošlého modelu (viz. Obrázok 4.3).



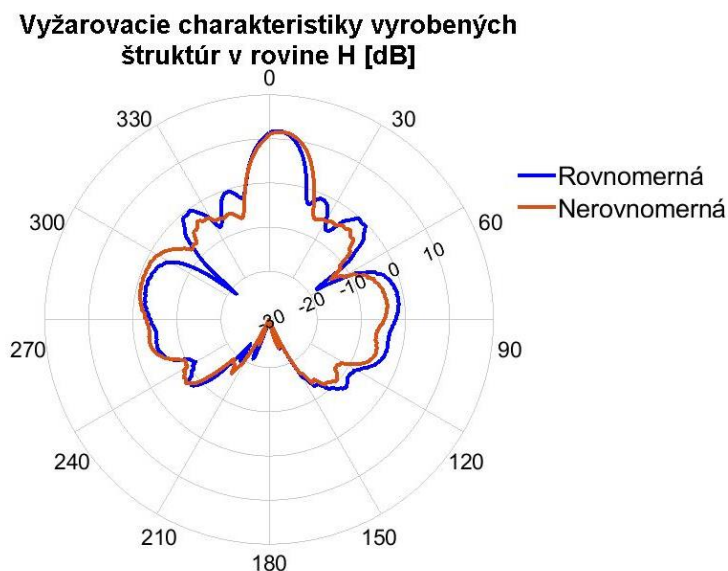
Obrázok 4.5 Porovnanie činiteľa odrazu z nameraných hodnôt pre obe štruktúry

Pri porovnaní činiteľov odrazu oboch vyrobených štruktúr (viz. Obrázok 4.5) môžeme konštatovať, že v oboch prípadoch nadobúdajú krivky na rezonančnej frekvencii hodnoty nižšie ako -10 dB a že sa výsledky, až na minimálne odchýlky, zhodujú.

Následne boli odmerané smerové charakteristiky oboch štruktúr a v grafe navzájom porovnané (viz. Obrázok 4.6 a Obrázok 4.7) a taktiež jednotlivo s hodnotami zo simulácií (viz. Obrázok 4.8 až Obrázok 4.11).

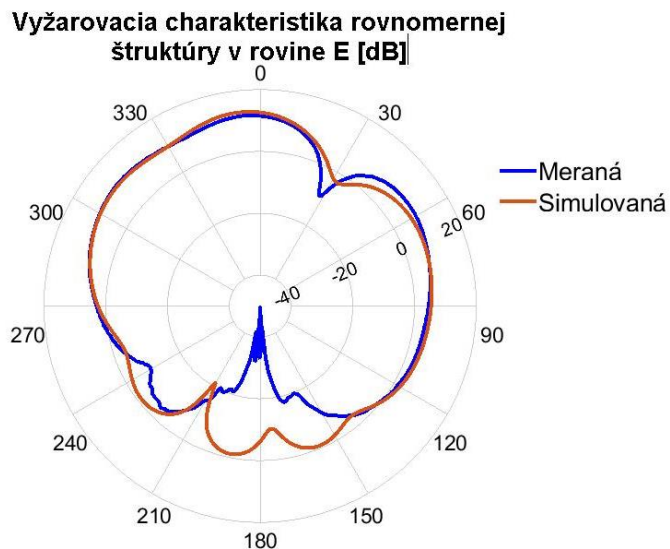


Obrázok 4.6 Porovnanie smerových charakteristík z nameraných hodnôt pre obe štruktúry v rovine E

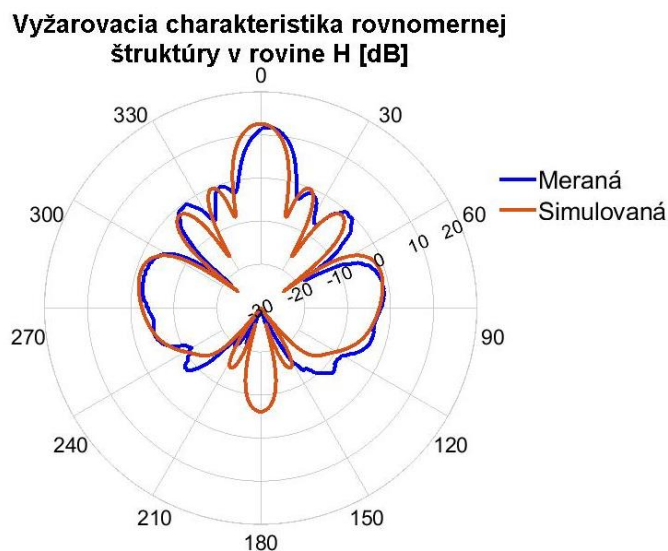


Obrázok 4.7 Porovnanie smerových charakteristík z nameraných hodnôt pre obe štruktúry v rovine H

Pre rovnomernú štruktúru je úroveň hlavného laloku 11,7 dB v rovine E, jeho šírka približne 79° a v rovine H dosahuje úroveň 11,8 dB a šírku laloku 13° (viz. Obrázok 4.6). Nerovnomerná štruktúra dosahuje v rovine E úroveň 11,1 dB a šírku 80° . V rovine H je úroveň 11,7 dB a šírka 15° (viz. Obrázok 4.7).



Obrázok 4.8 Porovnanie smerových charakteristík zo simulácie a merania pre štruktúru s rovnomerným rozložením výkonu na elementoch v rovine E

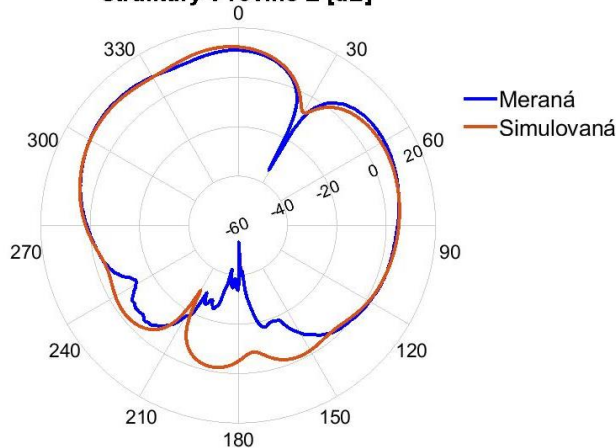


Obrázok 4.9 Porovnanie smerových charakteristík zo simulácie a merania pre štruktúru s rovnomerným rozložením výkonu na elementoch v rovine H

V oboch rovinách dochádza len k malému poklesu úrovne vyžarovania rovnomernej štruktúry. Pokles reálneho zisku voči teoretickému modelu je približne 0,8 dB. Táto

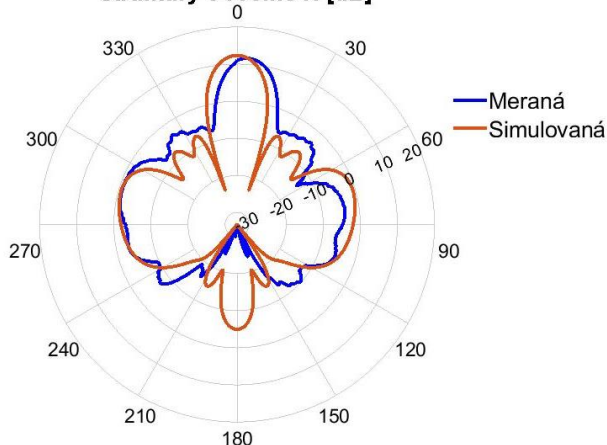
odchýlka môže byť spôsobená faktom, že meranie sa vzťahuje k normovaným hodnotám referenčnej antény z datasheetu, ktoré neboli experimentálne overené a teda nemusia byť korektné. Ďalším zdrojom nepresnosti môžu byť opäť hodnoty permitivity a stratového činiteľa udávané pre frekvenciu 10 GHz. U tejto rovnomernej štruktúry je priemerný odstup vedľajších lalokov od hlavného približne 13,8 dB.

Vyžarovacia charakteristika nerovnomernej štruktúry v rovine E [dB]



Obrázok 4.10 Porovnanie smerových charakteristík zo simulácie a merania pre štruktúru s nerovnomerným rozložením výkonu na elementoch v rovine E

Vyžarovacia charakteristika nerovnomernej štruktúry v rovine H [dB]



Obrázok 4.11 Porovnanie smerových charakteristík zo simulácie a merania pre štruktúru s nerovnomerným rozložením výkonu na elementoch v rovine H

U štruktúry nerovnomernej dochádza k poklesu zisku o približne 0,75 dB a priemerný odstup bočných lalokov od hlavného je zhruba 16,9 dB. Rozdiel odstupu bočných lalokov od hlavného medzi vyrobenou rovnomernou a nerovnomernou štruktúrou je približne 3,1 dB, čo je o 3 dB menej ako u výsledkov zo simulácií.

V oboch grafoch vyžarovacích charakteristík v rovine H je viditeľná mierna odchýlka smeru hlavného laloka, čo mohlo zapríčiniť nepresné upevnenie štruktúr pri meraní. Následne boli pre prehľadnosť zhrnuté všetky spomínané odstupy a taktiež do tabuľky (viz. Tabuľka 3.5.1).

Tabuľka 3.5.1 Zhrnutie jednotlivých hodnôt odstupu bočných lalokov od hlavného

	úroveň odstupu [dB]				úroveň potlačenia [dB]	
	Simulované		Merané		Simulované	Merané
	Rovn.	Nerovn.	Rovn.	Nerovn.	Ner.-Rov.	Ner.-Rov.
24°	13,3	19,5	13	17,5	6,2	4,5
42°	14,2	20,2	12,1	15,2	6	3,1
318°	14,2	20,2	14	17,4	6	3,4
336°	13,3	19,5	16,3	17,5	6,2	1,2
priemer	13,8	19,9	13,9	16,9	6,1	3,1

Podľa hodnôt z Tabuľka 3.5.1 môžeme zhodnotiť, že návrhom anténneho poľa s nerovnomerným rozložením výkonu na elementoch boli postranné laloky vyrobenej štruktúry potlačené v priemere o 3,1 dB.

5 ZÁVER

V práci bol čitateľ oboznámený s teóriou a problematikou návrhu flíčkovej antény a následne bol tento návrh postupne popísaný. Po niekoľkých optimalizačných úkonoch bol anténny prvok, takmer ideálne, odladený na zadanú pracovnú frekvenciu 10,5 GHz s vyhovujúcim činiteľom dorazu.

Po úspešnom návrhu flíčkovej antény bola pozornosť zameraná na návrh deliča s deliacim pomerom 1/4, čo znamená, že na jednotlivých výstupoch je možné očakávať ideálne štvrtinu výkonu dodaného na vstup deliča. Výsledky simulácii navrhnutého deliča ukazovali výstupné hodnoty podľa teoretických predpokladov a teda nanajvýš štvrtina výkonu na výstupe, čo znamená útlm rovný alebo väčší ako 6 dB.

Po odladení rovnomerného deliča bol navrhnutý delič s nerovnomerným delením výkonu pomocou Dolph-Chebyshevovej metódy. Nasledovalo zhodnotenie výsledkov a po porovnaní s teoretickými hodnotami a overení správnosti návrhu, boli oba deliče doplnené o anténne prvky a podľa potreby optimalizované.

Na záver boli vyrobené obe štruktúry. Ich parametre boli odmerané a v grafoch porovnané s výsledkami simulácií. Vo výsledku môžeme zhodnotiť, že návrh anténneho poľa splnil teoretické predpoklady a že bočné laloky vyžarovacej charakteristiky boli v priemere potlačené o približne 3,1 dB.

LITERATÚRA

- [1] ROHÁČEK, P. *Čtvercová fraktální anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 47 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Vladimír Hebelka.
- [2] IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE) e-ISSN: 2278-2834, p-ISSN: 2278-8735. Volume 9, Issue 3, Ver. II (May - Jun. 2014), PP 57-60 www.iosrjournals.org
- [3] *Inset Fed Microstrip Patch Antenna* [online]. 2015 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.microwavetools.com/inset-fed-microstrip-patch-antenna/>
- [4] Khaleel, Aymen. (2012). Design tri-band single and dual patch array antenna with band suppression. 10.13140/RG.2.1.1260.4329.
- [5] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2012. ISBN 978-0-470-63155-3.
- [6] LAMMINEN, Antti E. I., Jussi SAILY a Antti R. VIMPARI. 60-GHz Patch Antennas and Arrays on LTCC With Embedded-Cavity Substrates. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008, 56(9), 2865-2874. DOI: 10.1109/TAP.2008.927560. ISSN 0018-926X. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4618698/>
- [7] BEVELACQUA, Peter Joseph. *Dolph-Chebyshev Weights* [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/arrays/weights/dolph.php>
- [8] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 04-716-6782-X.
- [9] Radar Basics - Characteristic values of antennas. Grundlagen der Radartechnik [online]. Copyright © 2016 Christian Wolff www.radartutorial.eu [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antenna%20Characteristics.en.html>
- [10] GAJA, Tomáš Širokopásmové lineární anténny pole pro BAN aplikace: bakalářská práce. Místo: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 56 s. Vedoucí práce byl Ing. Jan Puskely, Ph.D.

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

W	Šírka flíčkovej antény.
c	Rýchlosť svetla vo vákuu.
f_r	Pracovná frekvencia antény.
ϵ_r	Relatívna permitivita substrátu.
ϵ_{ef}	Efektívna dielektrická konštanta.
h	Výška substrátu.
ΔL	Efektívne predĺženie antény.
L_{eff}	Efektívna dĺžka antény.
L	Dĺžka flíčkovej antény.
a, b	Pomocné parametre pre výpočet šírky mikropásku.
Z_q	Charakteristická impedancia vstupného mikropásku.
w_N	Šírka N ohmového mikropásku.
W_s	Šírka substrátu a zároveň zemnej plochy.
L_s	Dĺžka substrátu a zároveň zemnej plochy.
l_N	Dĺžka N ohmového mikropásku.
λ	Vlnová dĺžka.
AF	Faktor poľa.
w_n	Váha n-tého ramena deliča.
k	Vlnové číslo
S	Úroveň potlačenia bočných lalokov.
A	Pomer váh.
$Z_{OUT/IN}$	Impedancia vonkajších/vnútrotných ramien deliča.
$Z_{\lambda/4\ OUT/IN}$	Impedancia štvrt' vlnných transformátorov vonkajších/vnútrotných ramien deliča.